

A detailed map of the Cosmic Microwave Background (CMB) radiation, showing temperature fluctuations across the universe. The map features a central bright blue region, surrounded by intricate patterns of blue, green, and red, representing different temperature variations. The overall appearance is that of a complex, swirling, and textured field of energy.

Н. Горькавый

**Осциллирующая
Вселенная**

Н. Горькавый

Осциллирующая Вселенная



Об авторе: Горькавый Николай Николаевич, доктор физико-математических наук (МГУ, 1990), лауреат Государственной премии СССР (1989) и премии им. Роберта Годдарда (NASA/GSFC, 2013). Автор более ста научных статей, трех научных монографий и шести научно-популярных книг.

Астероид 4654 Gor'kavuj назван в его честь.

Фото: наблюдение полного солнечного затмения 2017 года

Аннотация

Новейшая космологическая революция началась в 2015 году, когда были открыты гравитационные волны от слияния множества невидимых черных дыр звездных масс, составляющих темную материю космоса. Это открытие привело к созданию модели осциллирующей Вселенной, в динамике которой гравитационное излучение и черные дыры играют ключевую роль. В данной книге впервые описывается циклическая космология, объясняющая физический механизм Большого взрыва и современного ускорения расширения Вселенной (феномен положительной космологической постоянной или «темной энергии»). Основной текст книги написан на популярном уровне, но приложение содержит исчерпывающее математическое описание осциллирующей Вселенной с переменной гравитационной массой. Книга представляет интерес для широкого круга читателей, студентов-физиков и специалистов.

354 стр., 12 рис., 16 илл., 7 таб.

Передняя обложка: Галактика Фантом
(ESA/Webb, NASA & CSA, J. Lee and the PHANGS-JWST Team)

Задняя обложка: цветная версия 15-ти иллюстраций из книги

Книга выпущена издательством Челябинского государственного университета в феврале 2023 года:

Осциллирующая Вселенная / Николай Горькавый. Челябинск : Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2023. 245 с. (ISBN 978-5-7271-1869-6)

Данная электронная версия книги практически идентична по тексту изданию ЧелГУ (с добавлением параграфа 20.3 и некоторыми исправлениями, в частности, в параграфе 9.4), но имеет другую верстку и обложку.

© Ник. Горькавый, 2023

Посвящается моим соавторам, выдающимся ученым и замечательным людям, без которых модель осциллирующей Вселенной осталась бы неполной, а эта книга не появилась бы:

Джону Мазеру,
Александру Василькову,
Сергею Тюльбашеву



Н. Горькавый и Дж. Мазер, 2013



С. Тюльбашев



А. Васильков, 2019

Предисловие	6
Часть I. Рождение феникс-космологии (1755-1965)	20
1. Краткая история циклической космологии до 1915 года	20
1.1. Иммануил Кант и Вселенная-феникс (1755)	21
1.2. Весто Слайфер и разлет галактик (1912-1914)	25
2. Общая теория относительности и пульсирующая Вселенная в 1915-1965 годах	27
2.1. Альберт Эйнштейн, ОТО и замкнутая Вселенная с Λ -членом (1915-1917)	28
2.2. Циклическая Вселенная и Александр Фридман (1922)	32
2.3. Закон расширения Вселенной Жоржа Леметра и Эдвина Хаббла (1927-1929)	34
2.4. Ричард Толмен и энтропия циклической Вселенной (1934).....	36
2.5. Горячая Вселенная и Большой отскок Георгия Гамова (1946-1953)	39
2.6. Реликтовое эхо Большого взрыва (1965)	45
Часть II. Кризис современных моделей Вселенной (1965-2015)	51
3. Проблема гравитационной сингулярности	51
3.1. Неотвратимость гравитационного коллапса	52
3.2. Сингулярности как кризис физики	57
4. Проблемы космологии Большого взрыва	61
4.1. Как вырваться из сингулярности или избавиться от нее?.....	61
4.2. Что является пружиной Большого взрыва?	64
5. Проблема темной материи	67
5.1. Фриц Цвикки и невидимая масса в скоплениях галактик	67
5.2. Вера Рубин и вращение галактик с темным гало.....	70
5.3. Поиски темной материи среди белых карликов и черных дыр ...	72
6. Волшебство квантовой космологии	75
6.1. Чудесный инфлатон как причина Большого взрыва одномерной Вселенной	76
6.2. Неуловимые ВИМПы как кандидаты в темную материю	78
7. Проблема темной энергии	80
7.1. Ускорение расширения Вселенной	80
7.2. Отрицательное давление квантового вакуума - новая теория эфира?	81
8. Кризис квантовой модели Вселенной	84
8.1. ВИМПы для темной материи: не найдены	85
8.2. Обоснование квантовой космологии: отсутствует	87
Часть III. Новая модель пульсирующей Вселенной	101
9. Выход из кризиса или свет в конце космологического туннеля.....	101
9.1. Столетние споры о реальности энергии гравитационного поля.....	102
9.2. Революция 2015 года: открытие гравитационных волн	110
9.3. Космологическая важность гравитационного излучения	113
9.4. Вселенная внутри черной дыры	116
10. Механизм Большого взрыва и решение проблемы сингулярности...	126
10.1. Переменная гравитационная масса и метрика Кутчеры	126
10.2. Антигравитация и гипергравитация в теории Эйнштейна	132

11. Природа Λ -члена и решение проблемы темной энергии	142
11.1 Первое приближение: классические уравнения Фридмана и решение проблемы космологической постоянной	142
11.2 Второе приближение: уравнения Фридмана с анизотропией и неоднородностью	146
12. Решение проблемы темной материи в циклической Вселенной	148
12.1 Темная материя из черных дыр звездных масс	149
12.2 Сверхмассивные черные дыры и Большая Черная Дыра	154
13. Проблема энтропии в циклической Вселенной	158
13.1 Энтропия Вселенной	159
13.2 Циклический баланс основных компонент Вселенной	167
Часть IV. Предсказания и подтверждения циклической космологии	176
14. Эмпирические тесты новой модели	176
14.1 Критерии Поппера: непроверяемая теория ошибочна	176
14.2 Предсказания новой теории циклической Вселенной	182
15. Формирование галактик и шаровых скоплений	186
15.1 Неустойчивость Джинса и образование шаровых скоплений	186
15.2 Рост спиральных и эллиптических галактик вокруг сверхмассивных черных дыр	189
15.3 Загадочное соотношение Галли-Фишера и реликтовые дыры	194
16. Анизотропия Вселенной	199
16.1 Глобальная анизотропия постоянной Хаббла	199
16.2 Есть ли у Вселенной центр, на который указывает «дьявольская ось»?	201
17. Непостоянство постоянной Хаббла	205
17.1 Постоянная Хаббла вдали и вблизи	205
17.2 Подрыв основ современной феноменологической космологии	207
18. Реликтовые нейтронные звезды	209
18.1 Самые прочные звезды Вселенной	209
18.2 Наблюдательные признаки реликтовых нейтронных звезд	211
19. Черные дыры и предсказание реликтовых гравитационных волн	213
19.1 Распределение черных дыр по массам	213
19.2 Гравитационно-волновое эхо Большого коллапса	220
20. Открытие предсказанного фона реликтовых гравитационных волн	222
20.1 Наблюдения наногерцовых волн по сигналам пульсаров	222
20.2 Ключевое подтверждение для модели циклической Вселенной	225
20.3 Реликтовые килогерцовые гравитационные волны	231
21. Прошлое и будущее Вселенной	234
21.1 Размышления о самом первом цикле Вселенной	235
21.2 Каким будет будущее Вселенной и финал человечества?	242
Заключение	246
Приложение I. Проблема гравитационной энергии в теории Эйнштейна	268
Приложение II. Модель циклической Вселенной в общей теории относительности	309
Иллюстрации	346

Предисловие

Рассеивание галактик - тема, которая объединяет планету. Да не вмешается никакое «космическое отталкивание», чтобы разделить нас!

Сэр Артур Эддингтон, выступление на конференции Международного Астрономического Союза (1932)

*Нельзя выводить истинность теории из ее неопровержимости.
Карл Поппер (1963)*

*Наука не демократична.
Филип Андерсон (1994)*

Тысячелетиями люди представляли Вселенную неподвижной, закованную в хрусталь или покоящуюся на черепаших панцирях. Сейчас мы знаем, что во Вселенной движется все, но до сих пор не знаем – почему? Самое грандиозное движение Вселенной - это ее расширение после Большого взрыва. Причина Большого взрыва и ускоренного расширения нашего мира – это самая большая тайна Вселенной, и она скрыта в ее прошлом.

Трое российских космологов - А. Д. Долгов, Я. Б. Зельдович и М. В. Сажин в книге «Космология ранней Вселенной» (1988) лаконично изложили историю космологии XX века так: «Раньше наибольшей популярностью пользовалась точка зрения, согласно которой наш цикл расширения явился продолжением предыдущего цикла сжатия. Существовала модель пульсирующей Вселенной. Однако эта картина не избавляла от вопроса о происхождении Вселенной, она просто отодвигала его на несколько циклов раньше. Дело в том, что во время каждого цикла должна возрастать энтропия Вселенной и в результате увеличиваться ее радиус в точке максимального расширения. Поэтому, очевидно, что бесконечного числа циклов быть не могло... Некоторой модификацией модели пульсирующей Вселенной явилась модель «отскока» от сингулярности... Сейчас, однако, наиболее привлекательной

выглядит идея квантового рождения мира, или рождения из «ничего».»

Циклическая модель XX века потеряла популярность еще и потому, что она не могла объяснить причину Большого взрыва, а также найти объекты, которые отвечают за «темную материю». Эта невидимая тяготеющая масса не только «раскручивает» внешние области дисков галактик, как следует из астрономических наблюдений, но и доминирует в скоплениях галактик, в несколько раз превосходя суммарную массу всех звезд и облаков.

Инфляционная квантовая космология, развиваемая Аланом Гусом и другими «инфляционистами» с 1981 года, предложила к концу XX века простую и логичную картину квантового рождения и эволюции Вселенной. Согласно квантовой космологии, наша Вселенная «одноразовая» и незамкнутая, то есть имеет один цикл развития — от Большого взрыва до неограниченного расширения и «тепловой смерти» - медленного остывания к абсолютному температурному нулю. Возникла Вселенная из «ничего» или из сингулярной точки с бесконечной плотностью, рассчитать происходящее в которой известные законы физики не позволяют. За кратковременное ускоренное расширение Вселенной после Большого взрыва отвечает гипотетическое квантовое поле — «инфлатон», а за темную материю — неоткрытые элементарные частицы ВИМПы (WIMP = Weakly Interacting Massive Particles), практически никак не взаимодействующие с обычным веществом, кроме как через тяготение. Инфляционисты рассчитывали, что будущая теория квантовой гравитации объяснит и обоснует инфлатон с ВИМПами, а также почти мгновенное расширение Вселенной из точки сингулярности, из которой, вообще-то, ничего расширяться не должно.

В 1998 году был открыт важнейший астрономический факт: поле галактик расширяется ускоренно. Это означает, что во Вселенной в настоящее время действует таинственная антигравитация, которая противостоит тяготению галактик друг к другу, и которая в первом приближении хорошо описывается космологической константой, введенной А. Эйнштейном в 1917 году. По аналогии с «темной материей» эту антигравитацию назвали «темной энергией», что вызывает немало путаницы

среди читателей популярных статей. Квантовые космологи предложили на роль «темной энергии» отрицательное квантовое давление вакуума, завершив на этом построение стандартной модели квантовой космологии. Почти два десятка лет такая картина мира оставалась общепринятой. В научно-популярной газете «Троицкий вариант» от 3 июня 2014 года ее главный редактор и астрофизик Борис Штерн торжественно заявил: «Теория инфляции стала новой революцией в космологии, затеянной в начале 80-х и триумфально завершающейся сейчас на наших глазах...»

Однако уже в 2015 году ситуация кардинально изменилась: специалисты заговорили о кризисе в квантовой космологии — и даже о новой революции в науке о Вселенной. Причины этого кризиса прозрачны.

Во-первых, несмотря на титанические усилия сотен теоретиков, квантовая теория гравитации (как и долгожданная квантовая «теория всего») так и не была создана, поэтому ни инфлатон, ни ВИМПы не получили теоретического обоснования ни в этих теориях, ни в каких-либо других. Проблема гравитационной сингулярности также осталась нерешенной. Попытка рассчитать отрицательное давление квантового вакуума (или величину темной энергии) в рамках существующих теорий дает величину или равную нулю, или на 120 порядков выше наблюдаемых значений. Последняя оценка стала знаменита, как «самое плохое предсказание» в теоретической физике.

Во-вторых, тщательные и весьма дорогостоящие поиски на подземных и космических детекторах всех типов, а также на ускорителях (включая БАК – Большой Адронный Коллайдер), не обнаружили никаких ВИМПов. Темная материя и темная энергия стали загадками без ответа.

В-третьих, ключевым событием стало открытие в 2015 году гравитационных волн на гравитационном детекторе ЛИГО. Его измерения показали, что эти волны, возникшие при слиянии двух черных дыр, уносят около 5% их суммарной массы, что эквивалентно примерно трем массам Солнца. ЛИГО доказал, что у черных дыр есть огромная и до сих пор остававшаяся незамеченной космологическая роль: их слияния изменяют гравитационную массу Вселенной (оставляя неизменным баланс инертной массы и энергии). Кроме того, ЛИГО зарегистрировал

необычно много следов слияний черных дыр в единицу времени — в тысячу раз больше, чем ожидали астрономы. Поэтому черные дыры стали реальными претендентами на роль темной материи, с совокупной массой больше, чем у обычной материи. Ряд исследователей предложил и объяснение тому, что эти многочисленные объекты трудно заметить по создаваемым ими гравитационным линзам. Было показано, что если черные дыры небольших масс гравитационно ведут себя как звезды, из которых они образовались, то гравитационная неустойчивость будет создавать компактные шаровые скопления из черных дыр. Это кластерирование черных дыр резко уменьшает вероятность их обнаружения с помощью гравитационного линзирования.

В-четвертых, в 2020 году из анализа данных космической обсерватории «Планк» был сделан вывод, что Вселенная не плоская, а, с вероятностью 99%, замкнута. Следовательно, она не будет разлетаться бесконечно — что противоречит предсказанию квантовой теории инфляции о плоской геометрии вечно расширяющейся Вселенной, остывающей в «тепловой смерти». Статья с этими результатами называлась «Свидетельство «Планка» о замкнутой Вселенной и возможный кризис космологии» и была опубликована в *Nature*. Аналогичный вывод делался раньше и на основе данных спутника WMAP. Кроме того, к настоящему времени накопились убедительные данные о глобальной анизотропии Вселенной и о непостоянстве постоянной Хаббла, что тоже противоречит существующей космологической парадигме и свидетельствует о ее кризисе.

В свете волны новых данных, идея квантового рождения мира из «ничего» уже не выглядит «наиболее привлекательной». В 2017 году на страницах журнала «Scientific American» даже развернулась беспрецедентная бурная дискуссия о научности (!) теории инфляции, которая имеет слишком много вариантов и подгоночных параметров, поэтому оказывается фактически неопровержимой, а, значит, не является наукой с точки зрения критериев, предложенных известным философом Карлом Поппером. Застрельщиками дискуссии были ведущие астрономы Принстонского и Гарвардского университетов, которые выразились о теории инфляции предельно жестко: "теория, которая может предсказать все, что угодно, ничего не предсказывает". Безусловно, против этого мнения выступило

множество квантовых оппонентов, но примечателен сам факт такой дискуссии.

Не удивительно, что с начала 21 века активно развиваются модели циклической космологии, которые переживают второе рождение. В последние годы удалось решить проблемы энтропии и сингулярности, не выходя за рамки общей теории относительности. Был предложен механизм Большого взрыва и современного ускорения Вселенной на основе взаимных превращений гравитационных волн и черных дыр. Модель циклической Вселенной, базирующаяся на общей теории относительности Эйнштейна, оказалась способной объяснить все наблюдаемые особенности Вселенной без введения гипотетических полей и частиц.

Труд, процитированный в начале Предисловия, был последней космологической книгой академика Я. Б. Зельдовича (1914-1987). В ней предполагалось, что наиболее вероятным кандидатом на роль темной материи являются нейтрино с энергией ~ 20 электрон-вольт. Эта идея впоследствии не подтвердилась, и А. Д. Долгов стал активно развивать более реалистичную модель, в которой темная материя определяется черными дырами. Отметим, что такое предположение хорошо согласуется с современными моделями циклической Вселенной. М. В. Сажин предложил в 1978 году метод регистрации низкочастотных гравитационных волн с помощью наблюдения пульсаров. Этот метод принес блестящие плоды к 2020-2021 годам, когда с его помощью североамериканскими (NANOGrav) и австралийским (PPTA) радиотелескопами были обнаружены наногерцовые гравитационные волны, которые являются реликтовыми волнами, аналогами реликтового микроволнового излучения. Это открытие тоже свидетельствует в пользу циклической Вселенной, которая уверенно набирает очки в соревновании с другими моделями.

Нобелевский лауреат Филип Андерсон в 2018 году высказался о необходимости построения космологии с переменной массой. В том же году аналогичные соображения развил другой нобелевский лауреат, Джон Мазер. Мысли этих двух выдающихся физиков являются ярким индикатором наступающих в космологии перемен и наилучшим введением к

этой книге, поэтому ниже мы приводим переводы тезисов Андерсона и Мазера.

Данная книга — первая, в которой доступно излагается история космологии циклической Вселенной от Иммануила Канта до наших дней. Она описывает революцию в космологии XXI века и содержит свежие новости с фронта передовых исследований, вызывающих острую полемику среди ученых. Книга рассчитана на широкого читателя и поэтому ее основной текст почти не содержит формул. Для заинтересовавшихся читателей и специалистов в Приложении II размещен обзор по циклической космологии с уравнениями. Этот обзор, как части III и IV данной книги, базируется на научных статьях Н. Горькавого, А. Василькова, Дж. Мазера и С. Тюльбашева (см. список литературы после Предисловия).

Новая космологическая революция открыла дверь в удивительную и глубоко логичную Вселенную, состоящую из массивных черных дыр, мощного гравитационного излучения и легкой барионной компоненты, которая смогла породить жизнь и пылливый разум.

Автор выражает благодарность Александру Василькову, Джону Мазеру, Сергею Тюльбашеву, Александру Кашлинскому, Дмитрию Макарову, Алексею Богомазову и Алексею Моисееву за полезные обсуждения и ценные замечания. Особая признательность Александру Березину, который подал идею о написания данной книги, и принял активное участие в этом проекте. Автор благодарит издательство Челябинского государственного университета и ректора Сергея Таскаева за поддержку и издание данной книги.

27 ноября 2022

Список научных публикаций, которые легли в основу данной книги:

1. Gorkavyi, N. “Origin and Acceleration of the Universe without Singularities and Dark Energy”. *Bulletin of the American Astronomical Society*. 2003, 35, #3.
<http://www.aas.org/publications/baas/v35n3/aas202/404.htm>
2. Gorkavyi N., Vasilkov A. “A repulsive force in the Einstein theory”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2016, 461 (3): 2929-2933. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw1517>

3. Gorkavyi N., Vasilkov A. "A modified Friedmann equation for a system with varying gravitational mass". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2018, 476 (1): 1384-1389. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty335>
4. Gorkavyi, N., Vasilkov, A., Mather, J. A Possible Solution for the Cosmological Constant Problem. In *Proceedings of the 2nd World Summit on Exploring the Dark Side of the Universe (EDSU2018)* Eds: B. Vachon and P. Petroff, Point a Pitre, Guadeloupe, France, 25-29 June 2018, <https://pos.sissa.it/335/039/pdf>, <https://doi.org/10.22323/1.335.0039>
5. Горькавый, Н.Н. и Тюльбашев, С.А. «Черные дыры и нейтронные звезды в осциллирующей Вселенной», *Астрофизический бюллетень*. 2021, т.76, N3, с.285-305. (Gorkavyi, N.N., Tyul'bashev, S.A. Black holes and neutron stars in an oscillating Universe. *Astrophys. Bull.*, 2021, 76, 229-247. <https://doi.org/10.1134/S199034132103007X>)
6. Gorkavyi, N. "Gravitational wave background discovered by NANOGrav as evidence of a cyclic universe". *New Astronomy*. 2021, 91: 101698. <https://doi.org/10.1016/j.newast.2021.101698>
7. Gorkavyi, N. "Accretion of Galaxies around Supermassive Black Holes and a Theoretical Model of the Tully-Fisher and M-Sigma Relations". *Galaxies*. 2022, 10: 73. <https://doi.org/10.3390/galaxies10030073>

Популярное изложение и обсуждение модели циклической Вселенной, состоящей из черных дыр и гравитационных волн:

1. Антон Бирюков, Павел Котляр «Вы хороните темную энергию?»- «Полагаю, что да», *Газета.ру*, 1 августа 2016, https://www.gazeta.ru/science/2016/08/01_a_9717293.shtml
2. Александр Березин "Русские физики сенсационно предложили заменить темную энергию антигравитацией", *Life*, 3 августа 2016, <https://life.ru/p/885692>
3. Александр Березин "Темная материя и энергия провалились в черную дыру", *ТАСС*, 31 декабря 2018, <https://nauka.tass.ru/sci/6816495>
4. Александр Березин "Сжимающаяся Вселенная столкнет нас в черную дыру. Но заметить конец света будет непросто", *Naked Science*, 8 августа 2021, <https://naked-science.ru/article/physics/universe-phoenix>

5. Александр Березин "Темная материя: что на самом деле представляет собой самое загадочное вещество Вселенной", *Популярная механика*, 21 марта 2022, <https://www.popmech.ru/science/467972-temnaya-materiya-zagadochnoe-veshchestvo-vselennoy/>
6. Николай Горькавый "Вселенная как феникс", *За науку!*, 17.12.2018
<https://znanauku.mipt.ru/2018/12/17/vselennoy-kak-feniks/>
7. Николай Горькавый "Вселенная: новая модель", *За науку!*, 30.04.2019
<https://znanauku.mipt.ru/2019/04/30/vselennoy-novaya-model/>
<https://znanauku.mipt.ru/2019/04/30/diskussiya/>
8. Руслан Сафин "До Большого взрыва. Астрофизик Николай Горькавый предлагает пересмотреть историю Вселенной", *Южноуральская панорама*, 18 июля 2016, https://up74.ru/articles/obshchestvo/86757/?sphrase_id=147722
9. Руслан Сафин "Внутри черной дыры. Астроном Николай Горькавый нашел центр Вселенной", *Южноуральская панорама*, 20 марта 2018,
https://up74.ru/articles/obshchestvo/101456/?sphrase_id=338354
10. Ethan Siegel "Ask Ethan: Could The Energy Loss From Radiating Stars Explain Dark Energy?" *Bigthink.com*, June 30, 2018, <https://bigthink.com/starts-with-a-bang/ask-ethan-could-the-energy-loss-from-radiating-stars-explain-dark-energy/>
(перевод: «Спросите Итана: могут ли потери на излучение звезд объяснить темную энергию?», 7 июля 2018, <https://habr.com/en/post/416433/>)
11. Кирилл Масленников "ЦИКЛИЧЕСКАЯ ВСЕЛЕННАЯ. Что будет после того, как вселенная сожмется?", 18 августа 2021, *QWERTY*,
<https://www.youtube.com/watch?v=xWKj5yJRk74>
12. Николай Горькавый «Вселенная, пульсирующая в черной дыре», *Наука и жизнь*, декабрь 2022, с. 2-14,
<https://www.nkj.ru/archive/articles/46846/>
13. Николай Горькавый «Цикличность Большого взрыва», *Наука и жизнь*, январь 2023, с. 2-11,
<https://www.nkj.ru/archive/articles/47321/>
<https://www.nkj.ru/archive/articles/47351/> (дискуссия)

Две последние популярные статьи представляют собой самое свежее и полное научно-популярное изложение модели пульсирующей Вселенной. Обсуждение циклической космологии с переменной гравитационной массой, которое бурно велось в научно-популярных журналах, социальных сетях и в Интернете (см., например, дискуссии на Хабре: <https://habr.com/en/post/396601/>; <https://habr.com/en/post/371363/>), показали, что циклическая модель оказалось непростой для восприятия даже среди физиков-профессионалов. Павел Иванов из ФИАН (Москва) ошибочно решил, что на роль «темной энергии» мы выдвигаем гравитационное излучение. Известный американский популяризатор Итан Зигель снисходительно заявил, что мы спутали антигравитацию и уменьшение притяжения. Марек Абрамович из Польши невнимательно прочитал статью и сделал неправильный вывод, что мы используем фиктивную координатную антигравитацию Гильберта, известную еще с 1917 года. Были случаи, когда критик вообще не читал статью и не проверял формулы, но уверенно заявлял: "Я категорически с этим не согласен". Были ничем не подкрепленные заявления о том, что наши расчеты неправильные и в них сделаны неверные приближения. Была критика тезиса о том, что гравитационные волны не включаются в источники гравитационного поля, хотя это является трактовкой общей теории относительности, данной самим А. Эйнштейном.

Наши критики пытались, но не смогли опубликовать свои малообоснованные возражения в реферируемых журналах. Бурное многообразие ошибочных реакций на положения теории, которые мы считали достаточно прозрачными, доказало необходимость книги, где физику циклической космологии можно изложить гораздо подробнее и глубже, чем это можно сделать в специализированных статьях. Мы благодарим наших читателей за интерес к обсуждаемой модели Вселенной и наших критиков за их неравнодушие.

Филип Андерсон, лауреат Нобелевской премии по физике за 1977 год.

*Филип Уоррен Андерсон (1923-2020) был одним из самых выдающихся и влиятельных физиков второй половины 20-го века. За 50-летнюю карьеру в Bell Labs, Кембриджском и Принстонском университетах он продемонстрировал превосходный вкус, глубокую интуицию и выдающиеся творческие способности, пытаясь понять, как устроена природа... Будущие историки будут считать его одним из величайших ученых мира.
Э. Зангвил, "Physics Today", 03/2022*

«Темная энергия как гравитационное излучение» (март 2018)
(из Anderson Ph.W. «Four last "conjectures"»,
<https://arxiv.org/abs/1804.11186>, 2018).

В ходе недавних наблюдений гравитационного излучения от столкновений черных дыр было подсчитано, что масса образующейся дыры на несколько солнечных масс (около 3-х, я полагаю) меньше суммы масс исходной пары, и, следовательно, сферическая оболочка из гравитационного излучения, проходящая мимо нас, переносит эквивалентную энергию. Если бы мы теперь измерили массу остатка, мы нашли бы его легче на 3 солнечных массы, и если бы мы вычислили локальную плотность вещества этого сектора, мы должны были бы заключить, что $3\rho + \rho$, член источника для гравитационного поля, уменьшился на эту сумму. Излучение от этого события не добавило гравитирующей плотности где-то еще во Вселенной, с точки зрения воздействия на нас, потому что оно миновало нас со скоростью света и находится вне наблюдаемого нами сектора Вселенной. Оно не было рассеяно за значительную долю времени Хаббла, пока оно летело к нам, и мы должны предположить, что оно не будет рассеяно и далее или не составит гравитационного «послесвечения», которое мы могли бы наблюдать. Мы должны заключить, что, хотя и немного, но этот

эффект заметно уменьшает суммарное притяжение и, следовательно, наше расширение замедляется меньше, т.е. мы ускоряемся. Этот последний момент является сутью данного аргумента: излучение не сохраняет полную массу с нашей точки зрения; масса необратимо теряется в той части Вселенной, где происходит такое событие.

Сейчас это событие и сумма таких событий могут не иметь большого значения для космологических уравнений, поскольку эти события относительно редки. Но мы знаем, что значительная часть массы многих галактик приходится на центральную черную дыру, которая должна была создаваться подобными событиями, которые излучать прочь некую заметную часть исходной массы. В этом смысле, такие черные дыры должны быть легче, чем общая масса, которая была ими поглощена. Фактически, процесс генерации гравитационного излучения происходит во Вселенной повсюду и постоянно - например, пара пульсаров, обнаруженная Тейлором и Хьюлзом, непрерывно излучает свою гравитационную потенциальную энергию, как показывают наблюдения. Недавно был найден объект, который был предварительно идентифицирован как черная дыра, возникшая в результате столкновения двух галактик и их сопутствующих массивных черных дыр, и я не видел оценки частоты таких событий в прошлом. Дело в том, что все это излучение создается необратимыми процессами, рассеивающими энергию, которая, согласно измерениям здесь и теперь, не дает вклад в суммарное гравитационное самопритяжение Вселенной, насколько мы можем это оценить. Наблюдаемая вселенная становится легче с какой-то неизвестной скоростью, в зависимости от величины необратимо улетевшего излучения. По-видимому, заметное количество гравитационной потенциальной энергии необратимо излучалось в процессе образования звезд, галактик и черных дыр. Это, по-видимому, не учитывается в современной космологии и может быть частью или даже всей «темной энергии», которая теперь постулируется. Я не смог убедить себя в том, участвует ли какая-либо часть спектра электромагнитного излучения в том же необратимом эффекте. Предполагается, что реликтовое излучение находится в тепловом равновесии, поэтому эти соображения к нему не применимы; но отдельные события, такие как сверхновые, - это

другое дело. В любом случае, это важно, если гравитационная энергия исчезает, и нам нужно знать, сколько ее излучается и образует фон, который мы только начинаем учиться измерять.

Джон Мазер, лауреат Нобелевской премии по физике за 2006 год (за космологические исследования).

«Большие космологические вопросы» (декабрь 2018)

(из статьи N. Gorkavyi, A. Vasilkov, J. Mather, «A Possible Solution for the Cosmological Constant Problem». In *Exploring the Dark Side of the Universe*. Eds: B. Vachon and P. Petroff, PoS(EDSU2018)039, <https://pos.sissa.it/335/039/pdf>, 2018).

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

Что, если нынешняя вселенная перестанет расширяться, скажем, потому что темная энергия имеет уравнение состояния, которое нам неизвестно, или, может быть, она не то, что мы думаем? Что случится с объектами, которые мы видим сегодня? Как они будут себя вести, если будут собраны вместе в каком-то гигантском сжатии? Будут ли звезды раздавлены и измельчены, испарятся ли в облака элементарных частиц, или они упадут в черные дыры и исчезнут из поля зрения? Будут ли черные дыры поглощать все, включая темную материю, которую мы считаем найденной? Что может остановить этот коллапс, если это вообще возможно? Будет ли коллапс иметь достаточную симметрию, чтобы вселенная снова стала гладкой, или она разделится на отдельные части вроде черных дыр? Другими словами, сможет ли наша нынешняя вселенная испытать отскок, а потом перестать расширяться и снова сколлапсировать? 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 именно она 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, энергией излучения, черными 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 $R_{\mu\nu} - 1/2 R g_{\mu\nu} = k(T_{\mu\nu}(matter) + t_{\mu\nu}(grav))$, где $t_{\mu\nu}(grav)$ будет чем-то вроде «гравитационного вклада» в тензор напряжения-энергии-импульса, явно ошибочна. Запись такого варианта выдает полное непонимание сути общей теории относительности. Энергия и импульс гравитационного поля полностью учитываются нелинейными частями оригинального 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 виде распространяющихся волн как эквивалентный источник, который естественным образом заменил бы импульсно-энергетические члены материальных полей и черных 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 черные дыры, энергия гравитационной волны распространяется наружу, а масса новой черной 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 Филипом У. Андерсоном [3]...

Если бы Земля внезапно уменьшила массу, мы ожидали бы изменение 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 черных 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?

Ссылки

[1]. Mather J.C. and Boslough J., The very first light. Basic Books, New York, 2008.

[2]. 'tHooft G. Strange misconceptions of general relativity. https://webspacescience.uu.nl/~hooft101/gravitating_misconceptions.html, 2010.

[3]. Anderson Ph.W. Four last "conjectures", arXiv:1804.1118, 2018.

Часть I. Рождение феникс-космологии (1755-1965)

Дебаты о том, как возникла наша вселенная, проходили в течение всей известной нам истории.

Стивен Хокинг (1993)

Глава 1. Краткая история циклической космологии до 1915 года

Этот космос, один и тот же для всех, не создал никто из богов, никто из людей, но он всегда был, есть и будет вечно живой огонь, мерно возгорающийся, мерно угасающий.

Гераклит (в изложении Алекса Климента)

Идея цикличности Вселенной встречается в целом ряде древних текстов и у многих античных авторов. Например, блестящий диалектик и язвительный мизантроп Гераклит Эфесский (5-6 в. до н.э.), учивший о важности существования противоположных начал в природе, говорил: «Все составилось из огня и в огонь разрешается. Все совершается по судьбе и слаживается взаимной противоположностью. ...Начало есть огонь, все есть размен огня и возникает путем разрежения и сгущения. ...Все возникает по противоположности и всею цельностью течет как река. Вселенная конечна, и мир един. Возникает он из огня и вновь исходит в огонь попеременно, оборот за оборотом, в течение всей вечности...» (из книги «О жизни, учениях и изречениях знаменитых философов» Диогена Лаэртского). Ипполит пишет, что Гераклит «пугает нас, и грозит, что некогда Вселенная будет испепелена, поскольку она разложится в то, из чего возникла». («Фрагменты ранних греческих философов», 1989). Рассуждения Гераклита дошли до нас только в пересказе других авторов, но они убедительно свидетельствуют о том, что философской идее о цикличности Вселенной уже тысячи лет.

Историю современного естествознания часто начинают с трудов Исаака Ньютона (1642-1727), который открыл законы

гравитации и создал современную динамику и небесную механику. Начало научной космологии можно отсчитывать с 1755 года, когда Иммануил Кант (1724-1804) выпустил свою знаменитую книгу по астрономии.

1.1 Иммануил Кант и Вселенная-феникс (1755)

Через всю бесконечность времен и пространств мы следим за этим фениксом природы, который лишь затем сжигает себя, чтобы вновь возродиться юным из пепла...

И. Кант (1755)

Иммануил Кант был гением, намного опередившим свое время. Этот трудолюбивый домосед из Кенигсберга (ныне Калининград) прославился как великий философ, но его вклад в астрономию не менее впечатляющ. В 1755 году Иммануил Кант опубликовал труд «Всеобщая естественная история и теория неба», в котором выдвинул и развил удивительно прозорливые положения о формировании и динамике небесных тел. Ученый глубоко освоил ньютоновскую динамику и подкреплял свои соображения математическими расчетами и оценками. Кант писал: «...я с величайшей осмотрительностью старался избежать всяких произвольных измышлений. Представив мир в состоянии простейшего хаоса, я объяснил великий порядок природы только силой притяжения и силой отталкивания – двумя силами, которые одинаково достоверны, одинаково просты и вместе с тем одинаково первичны и всеобщы. Обе они заимствованы мной из философии Ньютона. Первая в настоящее время есть уже совершенно бесспорный факт природы. Вторая, которой физика Ньютона, быть может, не в состоянии сообщить такую же отчетливость, как первой, принимается здесь мною только в том смысле, в каком ее никто не оспаривает, а именно для материи в состоянии наибольшей разреженности, как, например, для паров».

Таким образом, Кант строил свои астрономические модели на притяжении Ньютона и на такой силе отталкивания, как давление. Ему удалось заложить основы современной теории образования планет из газо-пылевых околозвездных дисков

(теория Канта-Лапласа). В качестве проницательности Канта можно привести следующий факт. Рассмотрев эксцентриситеты планет, Кант предположил еще в 1755 году, что «будут открыты новые планеты за Сатурном, более эксцентрические, чем Сатурн, и, следовательно, более близкие по свойствам к кометам... Последней планетой и первой кометой можно было бы... назвать ту, у которой эксцентриситет был бы настолько велик, что она в своем перигелии пересекала бы орбиту ближайшей к ней планеты...». Только в 1781 году Вильям Гершель открыл за орбитой Сатурна новую планету - Уран, что для астрономов стало полной неожиданностью. В 1846 году, на основе теоретических расчетов Адамса и Леверье, была открыта еще более удаленная планета-гигант Нептун. В 1930 году на обсерватории Лоуэлла был обнаружен крошечный Плутон с большим эксцентриситетом 0,25, пересекающий орбиту ближайшей к ней планеты – Нептуна. Плутон рассматривают сейчас не как планету, а, фактически, как крупную комету-транснептун – в полном соответствии с кантовским предвидением.

В своей книге Кант предсказал и обосновал расслоение колец Сатурна и существование в них многочисленных делений, вызванных взаимными столкновениями частиц колец. Это предсказание блестяще подтвердилось только в конце 20 века в ходе пролетов «Пионеров» и «Вояджеров» возле Сатурна. До этого ни один из теоретиков не смог построить теорию колец Сатурна, которая учитывала бы их неустойчивость из-за столкновений частиц. Такие модели были развиты лишь после открытия расслоения колец (см. Н.Н. Горькавый и А.М. Фридман «Физика планетных колец», 1994).

Кант был революционером и в области космологии. «Дайте мне материю, и я построю из нее мир» - гордо провозгласил он. Кант, опередив общее мнение на 170 лет, считал, что Млечный Путь, который является плоской системой из двигающихся звезд (таких далеких, что кажутся неподвижными), - всего лишь одна из многих галактик: «...разве не могут возникать... еще иные млечные пути в безграничном мировом пространстве?» Кант указывал, что галактики уже видны в телескоп: «Мы с изумлением увидели на небе фигуры, которые представляют собой не что иное, как именно подобные

системы неподвижных звезд, ограниченные общей плоскостью, - млечные пути... в виде эллиптических образований, мерцающих слабым светом из-за бесконечной удаленности от нас...».

Ученый не ограничивал размер Вселенной Млечным Путем, а предполагал, что она бесконечна, и ввел понятие о центре Вселенной – о точке, где находится «чрезвычайно большая масса и тело с громадной силой притяжения». Кант размышлял: «Рассеянная масса мирозданий, какими бы большими расстояниями они ни были отделены друг от друга, беспрепятственно стремились бы к гибели и разрушению, если бы с помощью присущих системам движений не было механизма связи с некоторым всеобщим центром – центром притяжения *Вселенной* и точкой опоры всей природы. Вокруг этого всеобщего центра тяготения всей природы, и сформировавшейся, и первоначальной, в котором, без сомнения, находится масса, с необычайной притягательной силой вовлекающая в сферу своего притяжения все миры и системы, которые уже созданы временем и еще будут созданы вечностью, вокруг этого центра, по всей вероятности, начала впервые формироваться природа, и именно там наиболее густо сосредоточены системы, а по мере удаления от этого центра они все более и более рассеиваются в бесконечности пространства».

Одновременно Кант сделал замечание: «Правда, в бесконечном пространстве ни одна точка, собственно говоря, не имеет больше права называться центром, чем любая другая...». Ученый рассуждал: «Сотворение мира – дело не одного мгновения. ...Пройдут миллионы и целые горы миллионов веков, в течение которых вдали от центра природы будут создаваться и достигать совершенства все новые миры и системы миров; несмотря на системное строение своих частей, они достигнут общей связи с центром, который стал исходным пунктом формирования и средоточием творения благодаря силе притяжения своей огромной массы».

По мнению Канта, миры во Вселенной находятся в состоянии непрерывного образования и гибели. Волна образования миров идет от центра Вселенной к ее периферии. «Таким образом, сформировавшийся мир находится между развалинами уже разрушенной и хаосом еще не сформировавшейся природы; ... несмотря на все опустошения,

беспреданно производимые брностью, размер Вселенной в общем-то будет увеличиваться».

Ученый наслаждался размышлениями о Вселенной: «Звездное небо... связывает меня сквозь необозримые дали с мирами и системами миров в безграничном времени их вращения, их начала и продолжительности».

Швейцарский профессор Рудольф Клаузиус в 1865 веке опубликовал работу, в которой сделал заключение: «Энергия мира постоянна. Энтропия мира стремится к максимуму». Таким образом, Клаузиус утверждал, что законы термодинамики обрекают Вселенную на остывание, на «тепловую смерть». Канта тоже занимает вопрос, что будет, когда весь мир будет поглощен хаосом разрушения? Гениальный мыслитель еще в 1755 году оптимистично и прозорливо возразил Клаузиусу: «Есть ли основание не верить, что природа, сумевшая перейти из хаоса к закономерному порядку и стройной системе, способна с такой же легкостью восстановить себя из нового хаоса, в который ее ввергло уменьшение ее движений, и возобновить первоначальную связь? Разве пружины, приводившие в движение и порядок вещество рассеянной материи, не могут вновь, после того как остановка машины привела их в состояние покоя, быть приведены в действие приумноженными силами и довольствоваться согласованностью по тем же всеобщим законам, по которым было осуществлено первоначальное формирование? Не потребуется долгого размышления, чтобы ответить на эти вопросы утвердительно, если принять во внимание следующее. После того как вялость круговых движений в нашем мироздании в конце концов низвергнет все планеты и кометы на Солнце, жар последнего неизмеримо возрастет благодаря смешению в нем столь многих и больших масс... Усиленный до крайности новым притоком питания и чрезвычайно летучей материей, огонь этот, без сомнения, не только вновь разложит все на мельчайшие элементы, но и с расширяющей силой, соответствующей степени жара, и со скоростью, не ослабляемой никаким сопротивлением промежуточного пространства, вновь разбросает и рассеет эти элементы в том же огромном пространстве, которое они занимали до первоначального формирования природы, чтобы затем, когда сила центрального огня из-за почти полного

рассеяния его массы уменьшится, сочетанием притягательных и отталкивающих сил повторить с не меньшей закономерностью прежние образования и присущие системам движения и породить новое мироздание».

Для Канта Вселенная была бесконечной, заполненной множеством млечных путей, нестационарной и даже расширяющейся. Она характеризуется как самоорганизацией, так и ростом хаоса. Вселенная Канта обладала способностью к самовосстановлению после разрушения и была бесконечна во времени. По Канту, пульсирующая Вселенная при сжатии разогревается так, что расщепляет вещество на мельчайшие элементы, после чего взрывается, разбрасывая эти частицы по огромному пространству. Расширяясь, Вселенная остывает, останавливается и снова сжимается, разогреваясь. Космологические рассуждения Канта, несущие на себе ограниченность знаний XVIII века, тем не менее, поражают своей интеллектуальной силой, правильно описывая основные особенности современной циклической модели Вселенной, обсуждаемой в нашей книге.

1.2 Весто Слайфер и разлет галактик (1912-1914)

Теперь, после открытия красного смещения света, приходящего от внегалактических туманностей, у нас... есть все основания утверждать, что Вселенная отнюдь не является статической.
Р. Толмен (1934)

Весто Мелвин Слайфер (1875-1969), скромный сын фермера, начал работать в частной обсерватории Персиваля Лоуэлла в 1901 году, после окончания университета. За несколько лет Слайфер овладел спектрографией и измерил скорости вращения Марса, Юпитера, Сатурна и Урана и доказал, что Венера вращается очень медленно, а Марс имеет в атмосфере слабые следы водяного пара. В 1909 году Лоуэлл предложил Слайферу получить спектры светлых спиральных туманностей, видимых среди звезд нашей Галактики, и измерить скорость

движения этих расплывчатых пятен. Их природа была неясна: некоторые астрономы полагали, что они являются далекими внегалактическими объектами, другие считали, что это внутригалактические туманности, закрученные спиралями вокруг отдельных звезд. Свет таких туманностей был слишком слаб, чтобы его можно было поймать обычным спектрографом. Слайфер решил переделать спектрограф и выбросил из него все призмы, кроме одной, а также поставил в шесть раз более светосильную фотокамеру. При такой конструкции прибора спектральные линии так сближались, что их приходилось изучать с помощью микроскопа. Зато получившийся спектрограф накапливал спектр объекта в двести раз быстрее оригинального инструмента. 17 сентября 1912 года Слайфер получил первый спектр Туманности Андромеды – самой крупной из списка возможных объектов наблюдений. Экспозиция снимка заняла почти семь часов. В ноябре и декабре Слайфер снял еще два спектра с экспозицией в 14 и 13 с половиной часов. В середине декабря Слайфер приступил к изучению полученных спектров и с удивлением обнаружил, что они значительно смещены в фиолетовую сторону. Если это смещение вызвано скоростью Андромеды и эффектом Доплера, то это означало, что Андромеда движется в сторону Земли с большой скоростью. Слайфер решил проверить эти странные данные и к январю получил четвертый спектр Андромеды. В январе 1913 года Слайфер начал детально исследовать все четыре полученных спектра и убедился, что Туманность Андромеды летит к Земле с огромной скоростью в триста километров в секунду. Это был ошеломляющий результат, потому что обычная скорость движения звезд относительно Земли составляла десятки километров в секунду. Такие же скорости должны были иметь спиральные туманности, если они являются «украшением» вокруг звезд. Если же Туманность Андромеды — большое внегалактическое скопление звезд, то таким космическим объектам по общему мнению, еще медленнее плавать в пространстве — как крупным китам в океане.

Из результатов Слайфера следовало, что Туманность Андромеды не может принадлежать к нашей Галактике, потому что гравитационное поле Млечного Пути не способно удержать в своих пределах такие быстрые объекты. Но если Туманность

Андромеды — внегалактический объект, то его скорость переворачивала все традиционные представления о космосе. К лету 1914 года Слайфер измерил спектры пятнадцати туманностей и доложил о своих результатах на августовском собрании Американского астрономического общества. Только три туманности, включая Андромеду, приближались к Млечному пути; остальные двенадцать туманностей двигались от Земли, то есть разбегались в разные стороны. После окончания доклада весь зал встал и устроил Слайферу овацию. Вместе с другими астрономами ему аплодировал и Эдвин Хаббл (1889-1953) — молодой студент, которого только что приняли в ряды Астрономического общества. Всем ученым стало понятно то, в чем был уверен Кант еще в 1755 году: туманности — это такие же галактики, как и наш Млечный Путь (см. иллюстрации 1 и 2). Но что заставляет их разбежаться в разные стороны?

В апреле 1917 года Слайфер выступил на конференции в Филадельфии. К тому времени он измерил скорости 25 галактик и только 4 из них двигались к Солнцу — остальные убежали от него, отчего их спектры смещались в красную сторону. Слайфер заключил, что это выглядит так, словно галактики отчего-то рассеиваются в пространстве. Результаты Слайфера были революционными: они убедили астрономов в том, что Вселенная на много порядков больше Млечного Пути и состоит из множества галактик, которые разбегаются в разные стороны с огромными скоростями. Стала очевидной необходимость кардинального пересмотра взглядов на Вселенную, потому что механика Ньютона не могла объяснить такой разлет галактик.

Настало время нестационарной Вселенной, которое предвидел Иммануил Кант.

Глава 2. Общая теория относительности и пульсирующая космология в 1915-1965 годах

Этот иностранец, более широко и более опасно, чем любой другой революционер на земле, распространяет смущение и беспорядок, сомнение и неверие и... содействует незаконному смятению к расшатыванию как Церкви, так и

Государства - и оставляет... законы природы и принципы науки в смущении и беспорядке.

Миссис Фросингем, 1932, Женская Патриотическая Лига. (Из досье ФБР. Цитируется по книге Ф. Джерома «Досье Эйнштейна», 2002)

Второе десятилетие XX века ознаменовалось революцией в мировой физике: в 1915 году Альберт Эйнштейн (1879-1955) в Берлине записал релятивистские уравнения общей теории относительности (ОТО), которые включили в себя не только все достижения ньютоновской гравитации, но и объяснили аномальную прецессию Меркурия, перед которой формулы Ньютона были бессильны. Космология вступила в новую бурную эпоху.

2.1 Альберт Эйнштейн, ОТО и замкнутая Вселенная с Λ-членом (1915-1917)

Никогда не выдвигалось ни одного приемлемого описания физических явлений, сравнимого с эйнштейновской теорией по простоте и широте охвата.

Ч. Мизнер, К. Торн, Дж. Уилер, «Гравитация», 1977

Знаменитый ньютоновский закон тяготения является решением уравнения Пуассона. Уравнение Пуассона в ньютоновской теории гравитации связывало гравитационный потенциал с плотностью гравитирующей материи. В традиционной записи уравнения Пуассона слева располагалась сумма вторых пространственных производных от потенциала, а справа – плотность источников гравитационного поля. Эйнштейн нашел уравнения, которые являются релятивистским и тензорным обобщением уравнения Пуассона. В основу релятивистского гравитационного потенциала ученый положил метрический тензор, описывающий искривленное пространство

(см. Приложение II). Поэтому в левой части уравнений Эйнштейна появился тензор Риччи, составленный из вторых производных от метрического тензора, а в правой части - тензор энергии-импульса вещества, который характеризовал источники гравитационного поля. Правильный вариант уравнений, объясняющих аномальную прецессию Меркурия, Эйнштейн записал в конце 1915 года. Но вопрос об источниках гравитационного поля оказался не прост и вызвал ожесточенные споры, о которых мы расскажем в разделе 9.1 и, более детально, в Приложении I.

Любая успешная теории должна не только объяснить наблюдаемые явления: критически важно правильно предсказать новые феномены, что позволяет сделать однозначный выбор между старой и новой теорией. Эйнштейн, на основании своих уравнений, предсказал, что свет звезды возле Солнца будет отклоняться в два раза сильнее, чем в теории Ньютона. Артур Эддингтон (1882–1944) был выдающимся английским астрофизиком и директором Кембриджской обсерватории. В 1919 году, воспользовавшись полным затмением Солнца, которое позволило наблюдать звезды вблизи солнечного диска, экспедиция во главе с Эддингтоном подтвердила предсказание Эйнштейна об отклонении света звезды в искривленном пространстве. Эту новость подхватила пресса, что помогло теории Эйнштейна получить широкое признание и среди ученых.

Легко представить трудности внедрения в научную практику таких понятий, как искривленное четырехмерное пространство-время, в котором время может замедляться до нуля, а мир может замыкаться, сворачиваясь в шар, как испуганный еж. В своей книге про теорию относительности Ганс Оганян приводит такую легенду: «Когда один немецкий физик сказал Резерфорду, что «ни один англосакс не может понять теорию относительности», тот согласился и ответил: «У них слишком много здравого смысла». К чести научного сообщества, нашлись специалисты, которые быстро и глубоко проникли в суть новой теории.

Общая теория относительности (ОТО) Эйнштейна за считанные годы стала основой для новой космологии. Уже в феврале 1917 года Эйнштейн опубликовал первую модель Вселенной, созданную на основании ОТО. Несмотря на то, что в

гравитации Эйнштейн был революционером, в области космологии он придерживался традиционных взглядов и полагал, что Вселенная должна быть статичной. Но уравнения гравитации, которые описывали только притяжение, не могли обеспечить стационарность Вселенной. И Эйнштейн ввел антигравитацию в свои уравнения в виде члена, содержащего новую феноменологическую «космологическую постоянную» Λ (его стали называть Λ -член). Задав баланс между гравитацией и антигравитацией, Эйнштейну удалось построить космологическую модель замкнутой, шарообразной Вселенной. Замкнутость Вселенной стала новым словом в космологии.

В ноябре 1917 года голландский астроном де Ситтер шагнул в нестационарную космологию и показал, что, при условии доминирования космологической постоянной, уравнения Эйнштейна имеют решение, согласно которому галактики во Вселенной могут разбегаться в разные стороны, как искры фейерверка. Де Ситтер первый употребил термин «разбегающаяся Вселенная». В упрощенной модели де Ситтера вещества вообще не было, а была только сила отталкивания из-за Λ -члена. В этой модели проявилась такая характерная закономерность, как рост красного смещения галактик (то есть скорости убегания от нас) с увеличением расстояния до этих галактик. Для иллюстрации этого эффекта обычно используют надувной шарик, на который нанесены точки галактик. При раздувании шара расстояние между нарисованными точками будет увеличиваться, причем скорость разбегания точек растет с увеличением расстояния между ними. Поэтому, чем дальше расположена какая-то галактика от Млечного Пути, тем быстрее она удаляется от нее. Исключением являются ближайšie к нам галактики, которые, или являются спутниками Млечного Пути или, как Туманность Андромеды, входят в местное, гравитационно-связанное скопление галактик. Такие галактики могут двигаться к нам.

Модель де Ситтера не отражала реальную картину Вселенной, но она была еще одним важным шагом в правильном направлении. Де Ситтер интерпретировал наблюдения Слайфера по разбеганию галактик как подтверждение своей модели. Он писал Эйнштейну в письме от 29 ноября 1920 года: «...очевидная

отталкивающая сила, вытекающая из моей интерпретации вселенной... оказывается реально существующей!»

Слайфер, Эйнштейн и де Ситтер вместе всего за пять лет – с 1912 по 1917 год - изменили представление астрономов о Вселенной, открыв разбегание галактик, создав релятивистскую теорию тяготения и получив из нее первые космологические решения.

Эддингтон пишет в своей знаменитой книге «Теория относительности» (1922): «Самые обширные измерения радиальных скоростей спиральных туманностей были проведены профессором В. М. Слайфером на Лоуэлловской обсерватории. Он любезно предоставил в наше распоряжение... таблицу, содержащую много еще не опубликованных данных. Эта таблица содержит вероятно все данные, полученные до февраля 1922 г. Здесь замечательно огромное преобладание удалений над приближениями».

Действительно, в таблице 1922 года были приведены скорости движения сорока одной туманности, и только пять из них двигались к нам со скоростями до 300 км/сек, а остальные разбегались со скоростями в несколько раз большими и достигающими 1800 км/сек.

Эддингтон, обладая огромным опытом астронома, смог оценить относительную удаленность туманностей в этой таблице, что позволило ему сделать следующий вывод: «... астрономические данные показывают, что с расширением границ изучаемой вселенной все более увеличиваются и наблюдаемые скорости; так, например, спиральные туманности, по-видимому, наиболее отдаленные из доступных наблюдению объектов, имеют скорости порядка 500 км в сек, т.е. приблизительно в 10 раз больше, чем скорости, наблюдаемые в нашей звездной системе. Вполне возможно, что на еще более далеких от нас расстояниях скорости будут еще больше». Эддингтон отмечает, что частица во вселенной де Ситтера «будет удаляться с ускорением, возрастающим по мере увеличения расстояния...».

Интересно, что космологическая модель де Ситтера была неоднородной - скорость течения времени в ней зависела от положения наблюдателя, тем самым спектры даже неподвижных удаленных объектов выглядели «покрасневшими». Как справедливо отметил Артур Эддингтон: «Это последнее

смещение может быть ошибочно истолковано как движение удаления от нас».

2.2 Циклическая Вселенная и Александр Фридман (1922)

Идеи Эйнштейна привели его к новому континенту, столь же неожиданному для него, сколь Америка оказалась для Христофора Колумба.

И. Пригожин

Третий закон динамики Ньютона гласит: действие равно противодействию. Но баланс сил может быть устойчивым или неустойчивым. Например, силы, действующие на маленький шарик, покоящийся на вершине большого шара (например, шарик для пинг-понга на глобусе), находятся в балансе, но любое ничтожное воздействие может вывести систему из равновесия – и маленький шарик скатится вниз. И наоборот: баланс сил, которые действуют на шар, лежащий на дне круглой чаши, устойчив: возмущение вызовет лишь колебания шара возле равновесия.

Стационарная модель Вселенной Эйнштейна оказалась нестабильной. Баланс сил гравитации и антигравитации, который предположил А. Эйнштейн, выполняется, если плотность мира равна космологической постоянной с некоторым коэффициентом. Плотность такого мира определяет и его размер. Если такая Вселенная чуть-чуть сожмется, то ее плотность вырастет, как и сила притяжения. Так как космологическая постоянная не меняется, то антигравитация не сможет нейтрализовать притяжение и удержать Вселенную от коллапса. И наоборот: если увеличить чуть-чуть размер Вселенной, то плотность ее упадет, и антигравитация окажется сильнее притяжения – и Вселенная должна будет расширяться бесконечно.

В 1922 году российский ученый Александр Фридман (1888-1925) в статье «О кривизне пространства» показал, что уравнения Эйнштейна описывают целую серию нестационарных моделей Вселенной при различных значениях космологической

постоянной, в том числе - и равной нулю. Фридман записал выражение для метрики пространства-времени нестационарной Вселенной (см. Приложение II) и получил формулы для размера Вселенной, которые сейчас называются уравнениями Фридмана. Они учитывали, как гравитирующую материю, так и антигравитирующий Λ -член, и содержали решения Эйнштейна и де Ситтера, как частные случаи. Уравнения Фридмана при разных предположениях математически описывали различные вселенные: расширяющуюся, сжимающуюся или циклическую, без детализации физических механизмов, которые управляют динамикой таких моделей. Фридман даже оценил период колебания пульсирующей вселенной с массой M : «Полагая $\Lambda=0$ и считая M равной массе $5 \cdot 10^{21}$ наших Солнц, будем для периода мира иметь величину порядка 10 миллиардов лет».

Реакция А. Эйнштейна на работу А. Фридмана была сначала отрицательной: «Результаты относительно нестационарного мира, содержащиеся в упомянутой работе..., представляются мне подозрительными» («Замечания к работе А. Фридмана «О кривизне пространства», 1922). После письма Фридмана, переданного Эйнштейну российским ученым Юрием Крутковым, Эйнштейн признал свою неправоту: «...моя критика... основывалась на ошибке в вычислениях. Я считаю результаты Фридмана правильными и проливающими новый свет. Оказывается, что уравнения поля допускают наряду со статическими также и динамические (т.е. переменные относительно времени) решения для структуры пространства» («К работе А. Фридмана «О кривизне пространства», 1923).

Вся современная космология базируется на уравнениях Фридмана. Полученную космологическую модель называют Вселенной Фридмана, а нестационарную метрику - метрикой Фридмана-Леметра-Робертсона-Уолкера.

Циклическая модель Вселенной, предложенная А. Фридманом на основе ОТО, красива и напоминает «феникса» кантианской вселенной. Отметим, что Вселенная Фридмана была основана на предположении изотропии (одинаковости свойств в разных направлениях) и однородности (одинаковости свойств в разных точках) нашего мира, по крайней мере, на больших масштабах. Это, безусловно, самое простое из возможных предположений; оно не является обязательным и нуждается в

обосновании и подтверждении. Видный специалист по космологии Ричард Толмен утверждал: «Гипотеза изотропии отнюдь не является таким фундаментальным законом природы, как принцип относительности... Возможно даже, что ее придется изменить коренным образом, если более мощные телескопы обнаружат систематическое нарушение однородности в разных частях Вселенной» («Относительность, термодинамика и космология», 1934). Это обычная научная практика: использовать самые простые теоретические предположения, до тех пор, пока они подтверждаются наблюдениями, и переходить к более сложным моделям - как правило, более богатым на приложения - лишь после получения наблюдательных фактов, которые указывают на необходимость этого.

Предположение об изотропии и однородности Вселенной выдерживало наблюдательные тесты в течение 100 лет, но данные начала XXI века потребовали отказа от этой гипотезы.

2.3 Закон расширения Вселенной Жоржа Леметра и Эдвина Хаббла (1927-1929)

По подсчетам Хаббла, внутри области радиусом $3 \cdot 10^8$ световых лет содержится около 10^8 туманностей!
Р. Толмен (1934)

В. Слайфер определил скорости движения галактик, но расстояния до этих галактик были неизвестны. В 1927 году аббат Жорж Леметр (1894-1966), ученик А. С. Эддингтона, предложил уравнение, связывающее скорость убегания галактик с расстоянием до них, но у него не было весомых наблюдательных подтверждений этого закона.

В конце восемнадцатого века Джон Гудрайк (1764-1786), двадцатилетний любитель астрономии, открыл переменность звезды Дельта Цефея, яркость которой колебалась с периодом в несколько дней. Причиной пульсаций таких ярких переменных звезд, которые называли цефеидами, является накопление световой энергии под поверхностью звезды. Мощное световое излучение расширяет звезду и прорывается наружу: наблюдатель

на Земле видит яркую вспышку. Потом внешние слои звезды остывают, сжимаются, становятся непрозрачными, снова начинают перехватывать свет, идущий из центра светила, и яркость звезды падает. Генриетта Ливитт (1868-1921), кропотливо исследуя фотопластины с изображениями Малого Магелланова Облака (спутника Млечного Пути), совершила фундаментальное открытие, которое позволило определять расстояния до других галактик. Ливитт обнаружила и изучила две с половиной тысячи цефеид - и заметила, что яркость цефеид растет с периодом их пульсаций. Следовательно, измерив период цефеиды, можно найти ее истинную яркость и расстояние до нее. Цефеиды стали настоящими астрономическими маяками.

Обнаружить и исследовать цефеиды в других галактиках было непросто. Лишь в 20-х годах Эдвин Хаббл на крупнейшем в те годы 100-дюймовом телескопе Маунт-Вильсона нашел цефеиды в Туманности Андромеды и оценил расстояние до нее в 900 тысяч (по современным данным — 2 миллиона) световых лет. Хаббл сумел сфотографировать ряд цефеид в других галактиках и измерить частоту их пульсаций, что позволило определить расстояние до этих звезд. Хаббл знал о работе Леметра: в 1928 году они встречались на III Генеральной ассамблее Международного астрономического союза (МАС) в Лейдене и обсуждали возможную корреляцию между скоростями галактик и расстояниями до них. В 1929 году Хаббл опубликовал статью, где сравнивал скорости разбегания галактик, найденные Слайфером и другими исследователями, с расстояниями до цефеид в этих галактиках и доказывал, что между ними существует линейная зависимость: чем дальше от нас располагается галактика, тем быстрее она от нас убегает. Работа Хаббла стала вехой в понимании Вселенной — больше игнорировать факт расширения популяции галактик было нельзя. Даже самые завзятые консерваторы были вынуждены признать, что мы живем в очень странной и беспокойной Вселенной.

История склонна к упрощению — во многих популярных книгах и даже в учебниках астрономии можно прочесть о том, что разбегание галактик открыто Э. Хабблом. Это неверное утверждение. Фундаментальный факт разбегания галактик открыт и исследован В. М. Слайфером. Гипотеза, что скорость разбегания галактик растет с расстоянием до них, была

выдвинута Ж. Леметром. А Э. Хаббл доказал эту гипотезу своими наблюдениями на крупнейшем телескопе. Долгое время вклад Леметра в закон расширения Вселенной был недооценен. Только в 2018 году Международный астрономический союз исправил эту несправедливость: в ходе XXX Генеральной ассамблеи МАС в Вене было организовано электронное голосование среди 14 тысяч членов МАС, и 78% проголосовавших высказались за восстановление исторической справедливости. Сейчас эта фундаментальная зависимость получила официальное название «закон Хаббла-Леметра».

Будучи членом МАС с 1997 г., я тоже проголосовал в 2018 г. за признание роли Леметра в открытии этого закона. Но нельзя забывать и ключевой вклад Весто Слайфера, чьи пионерские работы по определению скоростей разбегающихся галактик открыли новую эпоху в астрономии и легли в основу закона Хаббла-Леметра.

2.4 Ричард Толмен и энтропии циклической Вселенной (1934)

Теорема 13. То количество движения и покоя, которое Бог однажды сообщил материи, и теперь еще сохраняется его содействием.

Доказательство. Так как Бог есть причина движения и покоя..., то он сохраняет их той же силой, которой он их сотворил..., а именно в том же количестве, в котором он их первоначально сотворил..., что и требовалось доказать.

Б. Спиноза, «Основы философии Декарта, доказанные геометрическим способом» (1663)

В 1931 году Ж. Леметр опубликовал в журнале *Nature* короткую заметку с гипотезой, что причиной расширения Вселенной может быть ядерный взрыв. Он предположил «возникновение Вселенной из одного-единственного атома, чей атомный вес был бы равен полной массе Вселенной. Такой

крайне нестабильный атом начал бы делиться на все меньшие атомы в ходе некоего сверхрадиоактивного процесса».

Эта элегантная теория «протоатома» (Леметр называл ее «теорией фейерверка») отвечала тогдашнему уровню физики и недавнему обнаружению делимости радиоактивных элементов. Но такой «ядерный сценарий» эволюции Вселенной должен был приводить к обилию тяжелых элементов, потому что самым «прочным» химическим элементом, с наибольшим уровнем ядерных скрепляющих сил, является железо. Процесс развала огромных гипотетических атомных ядер исследовали такие известные физики-ядерщики как Мария Гепперт-Мейер (1906-1972), лауреат Нобелевской премии, и Эдвард Теллер (1908-2003), которого называют «отцом водородной бомбы». Они оба показали, что в результате леметровского ядерного взрыва самыми распространенными элементами во Вселенной должны были быть тяжелые элементы от железа до урана. В реальности железо и его соседи по таблице Менделеева являются лишь небольшой примесью в химическом составе Вселенной, где царит водород и гелий, поэтому идея «протоатома» Леметра не подтвердилась наблюдениями.

Эйнштейн считал вопрос о начале Вселенной не очень серьезным, ведь он был склонен считать Вселенную стационарной. Леметр рассказал Илье Пригожину (1917-2003) следующую историю. Когда Леметр заговорил с Эйнштейном о начале Вселенной, автора ОТО это не заинтересовало: «Это слишком похоже на акт творения, - сказал он Леметру, - сразу видно, что Вы священник!» (И. Пригожин «Эйнштейн, триумфы и коллизии»).

Искать связь между пространственно-временным расширением Вселенной и конкретной физической причиной этого раздувания решились редкие ученые. Пригожин говорит о законе Хаббла: «Связь между этим законом и «взрывающейся» вселенной Фридмана и Леметра была очевидна. Однако большинство физиков долгое время безмолвствовали перед этим описанием вселенной в историческом развитии».

Тем не менее, нашелся ученый, который решил изучить расширяющуюся и пульсирующую Вселенную с точки зрения термодинамики – словно Вселенная была огромной паровой машиной. Ричард Толмен, профессор Калифорнийского

технологического института, написал в 1934 году выдающуюся монографию «Относительность, термодинамика и космология», которая не устарела до сегодняшнего дня. В этой книге он особое внимание уделил циклической модели Вселенной, которую он рассматривал как наиболее реалистичный случай в пределе нулевой космологической постоянной. Толмен считал: «...в настоящее время не существует никакой теории, с помощью которой можно было бы хоть как-нибудь вычислить величину космологической постоянной», тем самым, как он полагал, «следует обратить особое внимание на осциллирующие модели, которые в этом случае становятся единственно возможными для описания закрытой Вселенной».

Толмен представлял Вселенную в виде своеобразного поршневого двигателя: «...ситуация здесь аналогична классическому случаю цилиндра с теплоизолированными стенками и движущимся поршнем, в котором происходит непрерывная последовательность сжатий и расширений диссоциирующего газа. При этом энергия и энтропия непрерывно возрастают до тех пор, пока хватает внешней энергии для очередного сжатия. В релятивистском же случае источником внешней энергии может служить потенциальная энергия гравитационного поля, связанная с плотностью эйнштейновского псевдотензора...»

Это был очень нетривиальный вывод. Клаузиус полагал, что Вселенная, как и все замкнутые системы, без внешних источников энергии должна остыть вплоть до «тепловой смерти». Илья Пригожин ввел понятие открытых систем, которые способны к самоорганизации, потому что к ним есть подвод внешних потоков энергии или вещества. Толмен же высказал мысль, что гравитационные системы – особенные, они, благодаря внутренней гравитационной энергии, даже будучи замкнутыми, могут развиваться, испытывать неустойчивости, порождающие структуры, и пульсировать. Действительно, если мы замкнем большой объем космического газа в непроницаемую оболочку, то это не запретит образование внутри этого объема новых звезд и планет, благодаря самогравитации газа, которая приводит к неустойчивости Джинса.

Толмен, показав способность замкнутой системы к гравитационной самоорганизации, одновременно установил

энтропийный предел на ее развитие. В своей книге он доказывал, что циклическая Вселенная обязана накапливать энтропию, тем самым, она не будет, строго говоря, циклической: «...хотя модель во время расширения или сжатия может проходить через состояния, в которых в некоторый момент выполняются условия, соответствующие физико-химическому равновесию, тем не менее, очевидно, что энтропия каждого элемента жидкости в конечном счете должна возрастать беспредельно, покуда происходят необратимые сжатия и расширения».

Это доказательство произвело такое сильное впечатление на сообщество физиков, что интерес к модели циклической Вселенной значительно ослаб. Многие физики, например, Я. Б. Зельдович, решили, что вывод Толмена запрещает модели циклической Вселенной.

В 30-е годы XX века, космология отступила на второй план перед лицом тогдашних трагических мировых событий. Германия, которая по праву считалась лидером научного сообщества, впала в слабоумие агрессивного национализма. В результате масса европейских ученых, включая Эйнштейна, эмигрировали в США, благодаря чему Германия навсегда перестала быть научной сверхдержавой, а немецкий язык потерял статус мирового языка науки. Разразившаяся вторая мировая война заставила правительства разных стран мобилизовать своих ученых на создание атомной и термоядерной бомб, ракет, радаров и прочего новейшего вооружения. Например, космолог Толмен занял видное положение в Манхэттенском проекте по созданию атомной бомбы.

Не удивительно, что следующий шаг в развитии космологии сделал одессит Георгий (Джордж) Гамов (1904-1968), эмигрировавший из СССР. Его биография значительно ограничивала участие в военных программах США, что оставляло ученому, который стал профессором университета имени Джорджа Вашингтона, достаточно времени для космологии, биологии и написания научно-популярных книжек.

2.5 Горячая Вселенная и Большой отскок Георгия Гамова (1946-1953)

Эта «космология большого взрыва» стала к настоящему времени общепринятой в основном благодаря энергичному характеру самого Гамова.

Нобелевский лауреат Х. Альвен, противник теории Большого взрыва

Некоторые ученые отвергали идею взрывного образования Вселенной очень долго, считая, что наблюдательный факт расширения Вселенной еще не означает того, что Вселенная раньше была маленьким и плотным объектом, впоследствии взорвавшимся. В середине XX века была популярна теория одноразовой Вселенной, выдвинутая Германом Бонди, Томасом Голдом и Фредом Хойлом, которая предполагала, что космос каким-то образом рождает по одному атому водорода в год в объеме «небоскреба средних размеров» (цитата из книги Ф. Хойла «The Nature of the Universe», 1950), отчего изначально холодная Вселенная бесконечно расплзается, как квашня из миски.

Интересно, что именно Хойлу, стороннику холодного старта Вселенной, принадлежит честь введения термина «Большой взрыв», хотя он использовал этот термин с иронией и в отрицательном смысле: «Эта идея большого взрыва выглядит для меня неприемлемой...» («The Nature of the Universe»). Гамов отмечает, что в свое время сторонником этой модели Вселенной являлся и известный советский астроном Б. А. Воронцов-Вельяминов (1904-1994). Теория Бонди-Голда потеряла привлекательность после накопления новых наблюдательных данных, свидетельствующих в пользу взрывного образования Вселенной, а броский термин «Большой взрыв» стал общепринятым, потеряв ироничный оттенок.

Одессит Г. Гамов закончил университет в Петербурге, был учеником А. Фридмана, а потом стажировался в Европе. Гамов был больше двух метров ростом и слыл завзятым шутником. Он стал самым молодым в истории член-корреспондентом Академии наук СССР и России: был избран в Академию в возрасте 28 лет. Вернувшись в СССР, он столкнулся

с тем, что его перестали выпускать за границу. В 1932 году Гамов вместе с женой решил нелегально эмигрировать и переплыть на легкой байдарке Черное море – из Крыма в Турцию. Отчаянная попытка закончилась неудачей: через два дня шторм пригнал байдарку назад к берегу. Лишь в 1934 году астрофизик Гамов с женой сумели с огромным трудом выехать из России, куда больше не вернулись.

Георгий Гамов был знаком с Эйнштейном, и их беседы способствовали возобновлению интереса Гамова к космологии. С 1946 года Гамов занялся космологией и ввел понятие Большого взрыва, как начала расширения Вселенной в виде горячего облака из смеси нейтронов, протонов, электронов и квантов света (Гамов назвал эту огненную смесь «Улем»). В том же году Гамов, его студент Р. Альфер и молодой ученый Р. Херман разработали первую реалистичную схему нуклеосинтеза - образования химических элементов при Большом взрыве. Гамов с соавторами также предсказали тепловое реликтовое излучение, оставшееся после остывания Вселенной, и оценили его температуру в несколько кельвинов. Гамов придерживался элегантной схемы образования Вселенной, включающей предыдущий цикл сжатия. В книге «Создание Вселенной» (1952) Гамов писал: "Мы можем задать себе два важных вопроса: Почему наша Вселенная была в таком сильно сжатом состоянии и почему она стала расширяться? Простейший и математически наиболее корректный ответ состоит в том, что *Большое сжатие, которое имело место в ранней истории нашей Вселенной, было результатом коллапса, который случился в еще более раннюю эру и, что нынешнее расширение есть просто "упругий" отскок, который начался, как только максимально возможная плотность была достигнута.*"

Проблема энтропии снималась в модели отскока тем, что она рассматривала половину космологического цикла (сжатие и расширение) и не волновалась о накоплении энтропии.

Гамов рисует в своей книге яркую картину эволюции Вселенной: «Мы подошли к концу нашего разговора, и картина процесса созидания начала вырисовываться - несколько туманная и фрагментарная, но в общих чертах вполне определенная. В смутном догалактическом прошлом мы видим проблеск метафизической «Эры Св. Августина», когда

Вселенная, из чего бы она ни была создана, была вовлечена в гигантский коллапс. Конечно, у нас нет информации об этой эпохе, которая могла длиться от минус бесконечности до примерно трех миллиардов лет назад, поскольку «археологические записи», относящиеся к тому далекому прошлому, должны были быть уничтожены дотла. Вещество Вселенной, должно быть, вышло из Большого сжатия в полностью разрушенном состоянии, образуя изначальный Улем из нейтронов, протонов и электронов. По мере того как Улем быстро охлаждался в результате расширения, эти элементарные частицы начали прилипать друг к другу, образуя агрегаты различной сложности, которые были прототипами сегодняшних атомных ядер. В течение этого раннего периода «ядерной кухни», который длился не более часа, условия во Вселенной были очень близки к тем, которые существуют в центре взрывающейся атомной бомбы. Космическое пространство было полно гамма-излучения высокой энергии, плотность массы которого значительно превышала плотность обычного атомного вещества. Температура по всей Вселенной была около миллиарда градусов, но плотность вещества была сопоставима с плотностью атмосферного воздуха на больших высотах».

Отметим, что во времена Гамова возраст Вселенной (от момента Большого отскока) оценивался в 3 миллиарда лет, хотя в реальности она на 10 миллиардов лет старше. Последние фразы Гамова означают, что барионная плотность вещества в начальный период расширения Вселенной была гораздо меньше плотности излучения из гамма-квантов.

Концепция Вселенной, расширяющейся после сильного сжатия, безусловно красива, но механизм «упругого отскока» был неизвестен, как и максимальная плотность Вселенной в этот момент. Природа упругого отскока Вселенной или Большого взрыва, пожалуй, самая интригующая проблема современной физики. Действительно, упругий отскок мяча понятен, потому что этот специально изготовленный легкий шар при ударе в десятки метров в секунду передает свою кинетическую энергию сжатому газу внутри, а потом использует эту накопленную энергию для обратного ускорения при отскоке. Но Вселенная – это объект в 10^{50} тонн, который движется с околосветовой скоростью. Какой естественный механизм может вызвать

остановку и отскок такой стремительно летящей гигантской массы?

Важным достижением группы Гамова было предсказание существования теплового излучения, оставшегося после остывания молодой и горячей Вселенной. Длина волны излучения растет пропорционально размеру Вселенной. Согласно оценкам Гамова, Альфера и Хермана, в расширившейся Вселенной это излучение должно быть аналогично излучению черного тела с температурой около 5 градусов Кельвина. На эти работы группы Гамова мало кто обратил внимание, хотя они были опубликованы в ведущих физических журналах: эта команда слишком опережала время и существующий уровень науки.

Несмотря на явный прогресс в космологии, профессиональных космологов в первой половине XX века было немного. В целом в астрономической среде доминировало отношение к космологии как к спекулятивному занятию, оторванному от реальности. Ситуация стала меняться после того, как ученые стали массово возвращаться из военных программ к мирной науке. Например, ряд выдающихся физиков – Я. Б. Зельдович, С. Вайнберг, А.Д. Сахаров - закончив работу в проектах по созданию ядерного оружия, в начале 60-х годов занялись астрофизикой и космологией. Академик Я. Б. Зельдович, ставший за создание термоядерной бомбы трижды Героем труда, был выдающимся организатором. Не удивительно, что он сумел организовать целую школу квантовой космологии при Московском государственном университете.

В эстонском городе Тарту, 7-13 июля 1962 года проходил семинар, материалы которого были опубликованы в сборнике «Вопросы космогонии» (1963). Эта книга содержит ряд интересных статей, отражающих развитие космологических концепций в эти годы. В статье «Дозвездная эволюция вещества» Я. Б. Зельдович разбирает теорию горячей Вселенной Гамова-Альфера-Хермана, попытки которых получить наблюдаемый химический состав космической среды, он считает «наивными». Зельдович пишет, что в этой модели «эффективная температура электромагнитного излучения (света) равна 23К» (то есть реликтового излучения, оставшегося от горячей стадии Вселенной). Зельдович делает заключение: «Следует признать,

что эти значения лежат за гранью разумного и не согласуются с современными представлениями о материальном и энергетическом балансе Вселенной». Далее Зельдович утверждает: «Возвращаясь к вопросу о начальной стадии мира, необходимо признать, что представления Гамова, Альфера и Хермана о высокой температуре в этой стадии противоречат современным сведениям». Сам Зельдович предпочитает другой сценарий. «Мы приходим к единственно возможному, единственно правильному варианту», а именно: «Гипотеза, согласно которой в качестве исходного вещества для звездной стадии эволюции берется холодный чистый водород, вполне согласуется с современными астрофизическими представлениями».

Академик А.Д. Сахаров писал про свои работы 60-х годов: «Я исходил тогда, вслед за Зельдовичем и многими другими авторами того времени, из так называемой «Холодной модели Вселенной», согласно которой начальная температура сверхплотного вещества предполагалась равной нулю (предполагалось, что вещество нагревается потом за счет тех или иных процессов, включая ядерные реакции)». («Научные труды», 1995)

Нетрудно заметить, что холодная модель Вселенной является аналогом термоядерной бомбы, которая при взрыве переходит из плотного холодного состояния в разреженное и горячее. Фактически, это было развитие модели «протоатома» Леметра, только, в духе тогдашнего военного прогресса, со сменой вселенской «боеголовки» с атомной бомбы на более мощный термоядерный заряд.

Модель изначально холодной Вселенной, нагреваемой термоядерным взрывом, была заметно дальше от реальности, чем модель Канта с возрастом более 200 лет, в которой Вселенная разогревалась при сильном сжатии. Зато модель Гамова хорошо согласовывалась с взглядами Канта, представляя собой более детальную модель Вселенной-феникса.

Споры космологов закончились в 1965 году, с открытием реликтового излучения Арно Пензиасом и Робертом Вильсоном, полностью подтвердившим модель горячей Вселенной и «наивную» теорию Гамова-Альфера-Хермана.

2.6 Реликтовое эхо Большого взрыва (1965)

Мы приходим к представлению, что Вселенная была порождена в некой катастрофе и, вероятно, к катастрофе же стремится. Если скорость расширения Вселенной достаточно сильно замедляется, это расширение в один прекрасный день прекратится и сменится сжатием. Результатом его может быть катастрофа, при которой галактики начнут сталкиваться друг с другом, и конец Вселенной окажется тогда подобным ее началу, который нас сегодня в основном интересует.

Р. Дикке «Гравитация и Вселенная» (1972)

Гамов, Альфер и Херман заслуживают колоссального уважения помимо всего прочего за то, что они серьезно захотели воспринять раннюю Вселенную и исследовали то, что должны сказать известные физические законы о первых трех минутах.

С. Вайнберг «Первые три минуты» (1981)

В своей книге 1933 года «Расширяющаяся Вселенная» Эддингтон, комментируя данные Милликена о космических лучах, приходящих изотропно от всех участков неба, первый употребил термин «реликтовый», отмечая древность такого изотропного излучения: «Я предполагаю, что это не свежий труп, а очень древняя мумия». «Если я прав, космическое излучение — это музей, собрание реликвий далекой древности. Эти реликты проштампованы надписью, указывающей размеры мира в его ранние века».

В 1941 году канадский астроном Э. Мак-Келлар в спектре молекул межзвездного циана обнаружил линии поглощения, которые соответствовали температуре среды в 2.3 кельвина. Это явление осталось необъясненным.

В 1955 году Т. А. Шмаонов из Пулковской обсерватории провел изучение радиоизлучения неба на длине волны 32 см и открыл изотропный фоновый шум с температурой 4 ± 3 кельвина. Ценность этого результата была не понята.

Советские астрономы А. П. Дорошкевич и И. Д. Новиков в 1964 году рассчитали - насколько интенсивность гипотетического реликтового излучения должна превышать в сантиметровом диапазоне интенсивность излучения обычных радиоисточников. Этот расчет показал возможность экспериментального обнаружения реликтового излучения (см. И. Д. Новиков, «Эволюция Вселенной», 1983).

Роберт Дикке (1916-1997), известный профессор Принстонского университета, придерживался модели осциллирующей Вселенной и рассматривал существующее расширение как фазу, последовавшую за предшествовавшим сжатием: «...я боюсь говорить о «рождении» Вселенной, ибо полагаю, что Вселенная не была «рождена», а скорее эволюционировала из прежней коллапсированной фазы... Можно полагать, что во время коллапса Вселенной энергия электромагнитного поля и нейтринного излучения чрезвычайно возрастает аналогично излучению при адиабатическом сжатии, пока, наконец, не достигается тепловое равновесие при температуре свыше 10^{10} °К. Неизвестным в настоящее время образом этот коллапс может быть обратим, т.е. Вселенная расширяется от этого очень горячего состояния.» («Gravitational Theory and Observation». Physics Today, 1967; перевод взят из «Эйнштейновского сборника» 1969-1970)

Дикке понимал, что излучение горячей начальной Вселенной может до сих пор существовать в космосе. Летом 1964 года Дикке и Джим Пиблс пришли к выводу, что это остаточное излучение можно зарегистрировать приборами. Вместе с П. Роллом и Д. Вилкинсоном они стали готовить эксперимент для обнаружения этого первичного космологического излучения. Но ученые Принстона опоздали.

В 1963 году физик Арно Пензиас предложил руководству лаборатории «Белл» модифицировать для радиоастрономических наблюдений антенну-рупор, которая была построена для экспериментов в области спутниковой связи, и получил согласие. К Пензиасу присоединился физик Роберт Вильсон - и они стали

превращать спутниковую антенну в сверхчувствительный инструмент для радиоастрономии.

С самого начала Пензиас и Вильсон знали про существующий дефект антенны - она «шумела». Инженеры, которые прежде работали с антенной и ловили сигналы спутников, не смогли избавиться от непонятного радиошума. Радиоастрономам Пензиасу и Вильсону эти помехи тоже мешали. Весь 1964 год ученые безуспешно пробовали самые разные варианты избавления от шума, включая изгнание голубей и очистку антенны от голубиного помета, который Пензиас и Вильсон в будущей научной статье деликатно назвали «белым диэлектрическим веществом». Упрямые голуби, выселенные и увезенные подальше от антенны, упорно возвращались на привычное место. Но ничего не помогало - даже вычищенная рупорная антенна регистрировала во всех участках неба шум, который соответствовал радиоизлучению черного тела с температурой в 3.5 градуса Кельвина.

Макс Планк (1858-1947), изучая, по просьбе промышленников, эффективность свечения электрических ламп, вывел универсальную формулу излучения тела, как функцию его температуры. Эта формула задавала вид спектра тела, то есть зависимость интенсивности его свечения от длины волны. Планковский спектр описывался плавной кривой с одним «горбом», который достигал максимума на определенной длине волны. Из формулы Планка следовало, что при нагреве тела максимум спектра смещается в сторону коротких волн. Поэтому рост температуры сдвигал спектр и цвет звезд от красных карликов к желтым светилам (как наше Солнце) и голубым сверхгигантам. Спектр остывающего тела смещался от инфракрасного излучения в радиодиапазон. Радиоизлучение с температурой в 3.5 кельвина соответствовало излучению черного тела с температурой минус 270 цельсиев, что близко к температуре колбы с жидким гелием. Таким образом, Пензиас и Вильсон получили странный результат — их антенна шумела так, словно вся Вселенная была заполнена очень холодным веществом, и этот шум был изотропным - он не зависел от направления антенны и шел отовсюду, из любой точки на небе.

В начале 1965 года Пензиас узнал от знакомого физика, что в Принстонском университете, который находился всего в

полусотне километров от их радиомантенны, группа знаменитого ученого Дикке работает над поиском остаточного излучения от взорвавшейся Вселенной, и там могут знать, что происходит с антенной-рупором.

Пензиас позвонил Роберту Дикке. Профессор задал несколько вопросов и назначил встречу. Через несколько дней, в конце марта 1965 года, Дикке, Ролл и Вилкинсон приехали к Пензиасу и Вильсону. Когда Дикке узнал, что измеренная температура радишума равна 3 градусам Кельвина, он повернулся к своей команде и сказал: «Они получили то, что надо!»

Ученые из лаборатории «Белл» и астрономы из Принстона опубликовали свои работы в одном журнале. Статья Пензиаса и Вильсона рассказывала об обнаружении постоянного радишума в космосе. В сопутствующей статье Роберт Дикке с соавторами (среди которых Д. Вилкинсон, в честь которого назовут спутник WMAP, запущенный в 2001 году, и Дж. Пиблс – будущий нобелевский лауреат 2019 года) правильно интерпретируют наблюдения Пензиаса-Вильсона в рамках модели замкнутой и циклической Вселенной. Группа Дикке полагала, что такая модель решает проблему барионной асимметрии (отсутствие антиматерии): «мы заключаем, что разумным образом можно сохранить сохранение барионов, если Вселенная замкнута и колеблется».

В статье описывалась циклическая переработка тяжелых атомных ядер: «Предполагая осциллирующую космологию без сингулярностей, мы полагаем, что температура должна была быть достаточно высокой, чтобы разложить тяжелые элементы из предыдущего цикла... В этой картине необходимо предположить, что в момент максимального коллапса температура Вселенной превысит 10^{10} °К, чтобы пепел предыдущего цикла переработался обратно в водород, необходимый для звезд в следующем цикле».

В статье Дикке-Пиблса-Ролла-Вилкинсона более ранние работы группы Гамова упоминались одной строкой как пример исследований в области нуклеосинтеза — без пояснений, что именно эта группа еще 17 лет назад получила правильные теоретические оценки реликтового излучения. Впоследствии Пиблс клялся, что ни он, ни Дикке, не видели работ Гамова. Но

предыдущая статья Пиблса о реликтовом излучении была отвергнута журналом на основании того, что 90% ее результатов получены ранее — в группе Гамова, Альфера и Хермана. Рецензент (которым был, видимо, сам Альфер) даже прислал Пиблсу список работ группы. Позже Альфер с горечью сказал: «Джим Пиблс знал о наших работах, если он не беспробудно туп!»

Пренебрежение результатами группы Гамова привело к тому, что в 1978 году Нобелевскую премию за открытие реликтового излучения получили наблюдатели Пензиас и Вильсон, но не получили теоретики Альфер и Херман, предсказавшие это излучение (Гамов к тому времени уже умер). Пензиас, отправляясь за Нобелевской премией, пригласил Альфера к себе домой, чтобы он помог ему с нобелевской речью. После этого визита расстроенный Альфер слег с сердечным приступом. Порадуемся же тому, что, Гамов, хотя и не смог получить Нобелевскую премию, но все-таки успел испытать восторг от открытия Пензиаса-Вильсона, которое подтверждало его давнее предсказание о реликтовом излучении Улема.

Последующие наблюдения реликтового излучения доказали идею Большого взрыва. В 1972 году, в книге “Cosmology, Fusion & Other Matters”, посвященной памяти Г. Гамова, нобелевский лауреат Арно Пензиас констатировал: «Картина Вселенной, которую смогли получить радиоастрономы, далека от полной и отличается в деталях, но она поразительно хорошо согласуется с картиной, нарисованной Георгием Гамовым (1949) четверть века назад». Эдвард Теллер в этой же книге отметил: «Джордж Гамов, Джо для своих друзей, был физиком с превосходным вкусом».

Важным этапом в развитии концепции Большого взрыва стал 1992 год, когда группа ученых, во главе с Джоном Мазером из Годдардского центра космических полетов НАСА, с помощью спутника COBE осуществила сканирование всего неба в нескольких десятках длин волн. Ученые группы COBE доказали, что реликтовое излучение с огромной точностью является тепловым и чернотельным. При этом они обнаружили, что флуктуации реликтового излучения составляют примерно одну стотысячную от свечения фона. Примерно в это же время, группа российского спутника «Реликт» оценила из наблюдений

неоднородность реликтового фона, работая с одной длиной волны. Тем самым, был определен уровень анизотропии реликтового излучения, что накладывало важные ограничения на космологические модели. Джон Мазер и Джордж Смут получили Нобелевскую премию 2006 года за доказательство чернотельности реликтового излучения и изучение его анизотропии.

Р. А. Сюняев и Я. Б. Зельдович в 1969 году предсказали эффект изменения температуры реликтового излучения при его рассеянии на электронах межзвездного газа. Сейчас эффект Сюняева-Зельдовича широко используется для измерения расстояний до скоплений галактик.

Таким образом, в 1965 году, после открытия реликтового излучения - так назвал первичное космологическое излучение известный советский астрофизик Иосиф Шкловский (1916-1985), концепция горячей Вселенной и Большого взрыва была подтверждена и приобрела широкую популярность. С этого момента, теоретики фокусировались на развитии модели Большого взрыва, а в истории космологии вступила новая эпоха.

Часть II. Кризис современных моделей Вселенной (1965-2015)

Ни в одной области науки, кроме космологии, нет такого количества произвольных и заведомо ошибочных теорий, сосуществующих во времени с правильной теорией.
Я. Б. Зельдович

После 1965 года космология горячей Вселенной, расширяющейся после Большого Взрыва, вступила в фазу интенсивного развития. Ученым предстояло решить ряд очень сложных проблем: найти причину Большого взрыва, а также спасти мир от гравитационной сингулярности, которая долгое время маячила перед физиками, но перед космологами встала во весь рост своей неотвратимости.

Глава 3. Проблема гравитационной сингулярности

Что эти раздражающие сингулярности нам говорят?
Р. Дикке

В теории поля не должно быть никаких сингулярностей.
А. Эйнштейн

Сингулярность является иллюзией.
Т. Бэнкс и У. Фишлер

Если в формуле Ньютона для силы притяжения на поверхности гравитирующего шара (например, Земли) уменьшить радиус шара до нуля при постоянной массе, то сила тяготения устремится к бесконечности. Физики назвали эту нулевую точку «сингулярностью» от латинского «singularis» - отдельный, особый. Возле сингулярности гравитационная сила должна абсолютно доминировать над всеми остальными

физическими силами: ядерными, электромагнитными и т.д. Эта теоретическая возможность кажется малореальной. Кто из нас, сидя на стуле, боится провалиться к центру Земли? От такого падения нас удерживают силы упругости стула, фундамента здания и самой земной коры.

Природа многообразно балансирует. Даже в жидком огненном Солнце, возле которого многие миллиарды лет греется наша планета, существует точный баланс между гравитацией и суммарным давлением плазмы и излучения: гравитация стремится притянуть вещество к центру Солнца, а давление не позволяет этого сделать и выталкивает вещество наружу. Так корабль плывет по тонкой пленке баланса между гравитацией, которая хочет его утопить, и выталкивающей спасительной силой Архимеда.

Но любое равновесие меняется со временем и может быть разрушено.

3.1 Неотвратимость гравитационного коллапса

*Открытие, что сингулярности являются неизбежным следствием эйнштейновских уравнений общей теории относительности, явилось шокирующим известием для большинства физиков, и этот шок у многих еще не прошел.
Кип Торн (1994)*

Звезды эволюционируют: рождаются, живут и умирают - тихо или со взрывом. Темп эволюции, а также ее конечный результат, зависит от начальной массы звезды. Одним из самых распространенных финалов эволюции звезды типичной массы является ее остывание и распухание в «красный гигант» (это судьба и нашего Солнца). Потом красный гигант сбрасывает внешнюю оболочку, которая становится расширяющейся планетарной туманностью, и превращается в «белый карлик», состоящий из углерода и кислорода. Белый карлик – это компактная горячая звезда с массой, близкой к солнечной, но по размеру меньше Солнца в сто раз, то есть диаметр белого

карлика сопоставим с диаметром Земли. В начале 20 века эти малозаметные крохотные звезды, разогретые до высокой температуры в десятки и даже сотни тысяч градусов, были выделены в отдельный класс. Плотность белого карлика превосходит плотность обычной звезды на много порядков и достигает 10^5 - 10^9 г/см³ или до тысячи тонн на кубический сантиметр. Баланс давления и гравитации в белых карликах необычен. С развитием квантовой механики пришло понимание, что в этих звездах, из-за колоссального сжатия, электронные оболочки атомов разрушены. Вещество белого карлика представляет собой сверхплотную плазму из ядер и электронов. В таком ядерно-электронном плазменном шаре гравитация уравнивается давлением вырожденного газа электронов.

Молодой индийский астрофизик Субраманьян Чандрасекар в 1929 году, во время долгого путешествия на пароходе из Индии в Англию, рассчитал, что в белом карлике с массой на 40% больше, чем масса Солнца, сила давления электронного газа уже не сможет противостоять гравитации. Такая звезда должна коллапсировать неограниченно. Этот шокирующий результат был основан на тонких квантовых эффектах в вырожденной сверхплотной материи белого карлика. Чандрасекар сделал в Англии доклад о своей работе, но эта работа была весьма критично воспринята авторитетным А. С. Эддингтоном, который категорически отказался признавать наличие в природе неограниченно сжимающихся звезд. Знаменитого астронома, создавшего классическую теорию равновесия звезд, можно понять: работа Чандрасекара подрывала баланс, который лежит в основе существования, как звезд, так и всей природы. Физическая интуиция гениального Эддингтона подсказывала ему, что в реальном мире (или в правильной физической модели этого мира) неограниченно сжимающихся звезд (или, на современном языке, сингулярностей) быть не должно.

Ближих взглядов на существование сингулярностей в физических системах придерживался и сам Эйнштейн. Он предполагал, что существует запрет на достижение радиуса Шварцшильда. В 1939 году Эйнштейн попытался показать, что шварцшильдовский радиус - на котором время останавливается с точки зрения внешнего наблюдателя - недостижим для реальных

систем («О стационарных системах, состоящих из многих гравитирующих частиц и обладающих сферической симметрией»). Эйнштейн отмечал: «Настоящее исследование возникло из дискуссий... о математическом и физическом смысле шварцшильдской сингулярности. Эта проблема совершенно естественно привела к вопросу о том, допускают ли физические модели существование такой сингулярности. Настоящая работа отвечает на этот вопрос отрицательно». Но Эйнштейн ошибся в интерпретации своих результатов (в физике правильная интерпретация математики часто сложнее самой математики). Позже Эйнштейн высказывал надежду, что космологическая сингулярность в рождающейся Вселенной исчезнет в рамках будущей единой теории поля («О «космологической проблеме»», 1945).

Началась длинная история борьбы физиков против неукротимого коллапса и сингулярностей.

Работа Л. Ландау (1932), а также расчеты Р. Оппенгеймера и Дж. Волкова (1939), сделанные на основе статей Р. Толмена, показали, что сжатие белого карлика останавливается давлением вырожденного нейтронного газа на размерах в десятки километров. Такая звезда, получившая название «нейтронная», фактически представляет собой огромное атомное ядро с плотностью в несколько раз выше, чем $4 \cdot 10^{14}$ г/см³ – плотность обычных атомных ядер. Но из расчетов получалось, что, если масса нейтронной звезды превосходит массу Солнца в 2-2.5 раза, то давление нейтронного газа тоже сдастся перед силой гравитации – и звезда коллапсирует неограниченно, сжимаясь в черную дыру с размером в несколько километров. Гравитация снова победила!

С точки зрения ньютоновской гравитации, черные дыры – это такие массивные тела, скорость убегания (или вторая космическая скорость) на поверхности которых больше скорости света. В рамках ньютоновской теории такие объекты были предсказаны англичанином Дж. Митчеллом еще в 1783 году и французом П. С. Лапласом в 1799 году.

В рамках теории Эйнштейна решение для черных дыр было получено Карлом Шварцшильдом (1873-1916), директором Потсдамской обсерватории, который во время первой мировой войны был офицером-добровольцем и решал математические

уравнения для повышения точности огня артиллерийских батарей. Воюя на русском фронте, он прочитал статью Эйнштейна и нашел решение его уравнений для случая гравитирующей точки. Он послал это решение Эйнштейну 22 декабря 1915 года, написав в письме: «Как видите, война ко мне была милостива, разрешив мне, невзирая на жестокий артиллерийский огонь в непосредственной близости, совершить эту прогулку в страну ваших идей».

Через четыре месяца Шварцшильд умер во фронтовом госпитале от тяжелой болезни, но обессмертил свое имя этой работой, которую Эйнштейн сам отправил в печать. Радиус черной дыры получил название радиуса Шварцшильда. Он зависит только от массы тела и равен радиусу горошины (0.443 см) для Земли или радиусу небольшого астероида (2.96 км) - для Солнца. С поверхности тел с такими массами и радиусами не может вырваться наружу даже луч света, за что Дж. Уилер в 1968 году предложил название «черные дыры» для таких плотных объектов. Уилер вспоминает, что этот термин кто-то выкрикнул на его лекции (Дж. Уилер и К. Форд «Геоны, черные дыры и квантовая пена», 1998).

Пространственно-временная метрика, которую получил Шварцшильд, показывает, что, с точки зрения внешнего наблюдателя, время замедляется при приближении к гравитирующему телу, а на радиусе Шварцшильда оно полностью останавливается. Поэтому коллапсирующее тело застывает в медленном времени перед самым превращением в черную дыру. Математик Роджер Пенроуз предположил, что природа сама позаботилась о том, чтобы внешний наблюдатель никогда не увидел сингулярности. Эта гипотеза получила название «принцип космической цензуры».

Говоря о черных дырах, всегда приходится учитывать, что уравнения теории относительности могут быть рассмотрены с точки зрения двух наблюдателей – внешнего и падающего, и соответствующие решения уравнений Эйнштейна равноправны, хотя и совершенно различны. На первый взгляд, остановка времени на границе черной дыры полностью решает проблему неограниченного коллапса и сингулярности. Но гравитация обошла и это препятствие, потому что для наблюдателя, падающего в черную дыру, момент прохождения радиуса

Шварцшильда ничем не примечателен и никаких особенных ощущений он не испытывает (предполагая, что его размер очень маленький по сравнению с размером коллапсирующей звезды, поэтому приливными силами можно пренебречь). Это называется парадоксом несовместимости точек зрения внешнего и падающего наблюдателя. Падающий наблюдатель за конечное собственное время достигнет сингулярности и сожмется в точку с бесконечной плотностью. Бесконечными становятся также гравитационные и приливные силы, которые разрывают самого прочного наблюдателя еще до достижения им сингулярной точки (его трагическую кончину любят обсуждать в популярных книгах). Таким образом, гравитация преодолела все барьеры и подвела нас вплотную к неотвратимой сингулярности или к неотвратимой необходимости ее уничтожения.

Парадоксальность ситуации в том, что в момент пересечения поверхности черной дыры падающий наблюдатель обнаруживает поразительный факт: оставшаяся Вселенная мгновенно проэволюционировала до конца своей истории или до своего бесконечного будущего. С точки зрения внешнего наблюдателя внутренний наблюдатель, пересекая границу черной дыры, должен оказаться даже не в бесконечно далеком будущем, а в будущем, которое «расположено» за бесконечным временем внешней Вселенной. А с точки зрения падающего наблюдателя, внешний наблюдатель, даже будучи бессмертным, должен, тем не менее, каким-то образом умереть и закончить свою историю.

Это выглядит предельно странно, но именно так гласят строгие решения общей теории относительности. Роджер Пенроуз так описывает наблюдателя, падающего в черную дыру: «Когда он смотрит на вселенную, которую он «покидает», то, бросив на нее последний взгляд при пересечении [границы черной дыры], наблюдатель видит всю последующую историю остальной части его «прежней вселенной» («Структура пространства-времени», 1972).

«То, что бесконечно во времени внешнего наблюдателя, конечно по часам падающего. Можно ли привести более наглядную иллюстрацию относительности понятия временной бесконечности?» (Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков, «Релятивистская астрофизика», 1967). Современные учебники

редко рассматривают факт несопоставимости точек зрения двух наблюдателей, но никто не может ответить на вопрос: что происходит с внешним наблюдателем и со всей внешней Вселенной в момент, когда падающий наблюдатель уже пересек границу черной дыры? Что такое время, большее, чем бесконечность? Этот парадокс незаслуженно забыт, хотя в свое время теоретики, включая группу Ландау, долго ломали над этим головы. Е. М. Лифшиц говорил: «Вы не можете себе представить, как трудно для человеческого мышления понять, как могут обе точки зрения быть верны одновременно» (цитируется по книге К.Торн, «Black Holes and Time Warps», 1994).

Таким образом, мы имеем два факта, верных одновременно: для внешнего наблюдателя падающий смельчак *навсегда* застревает возле радиуса черной дыры. Падающий же наблюдатель обнаруживает, что черная дыра легко достижима, зато за его плечами остальная Вселенная закончила свою историю и историю всех своих внешних наблюдателей. Поверхность Шварцшильда не может остановить падение наблюдателя, а, следовательно, он должен достичь центра черной дыры и сжаться в сингулярную точку вместе со всем содержимым черной дыры.

Неотвратимость наступления сингулярности с бесконечными физическими величинами в ней вызвало кризис в физике. Проигнорировать сингулярность, в которую устремляются падающие наблюдатели, нельзя еще и потому, потому что космология Большого взрыва часто строится, начиная с точки. Как отмечает С. Хокинг (1942-2018): «Считается, что в момент большого взрыва размеры Вселенной были равны нулю, а сама она была бесконечно горячей». Следовательно, проблема сингулярности должна быть решена, потому что многие теории начинают расширение Вселенной из точки.

3.2 Сингулярности как кризис физики

Пенроуз показал, что теория Эйнштейна предсказывает свою неполноту. «Бесконечности» в

теории - это сигнал о вмешательстве какой-то новой физики.
Сэр Мартин Рис, королевский астроном

Наблюдатели доказали, что черные дыры существуют в системах двойных звезд и в центрах всех галактик, включая и нашу. В данную секунду мы вместе с Солнечной системой несемся со скоростью 220 километров в секунду вокруг гигантской черной дыры в центре нашей Галактики. Можно ночью найти на небе середину Млечного Пути на стыке созвездий Стрельца, Скорпиона и Змееносца, и посмотреть на эту черную дыру, вернее - на то место, где главная черная дыра нашей Галактики прячется за темными межзвездными облаками.

Когда черные дыры в сознании ученых стали реальными объектами, вырос интерес к поведению вещества внутри черной дыры. Если гравитация преодолела все барьеры давлений, и даже с помощью остановки времени нельзя удержать коллапсирующее вещество на радиусе Шварцшильда, то можно ли, с помощью какого-нибудь трюка, избежать бесконечной плотности в центральной особой точке, то есть, в сингулярности?

Рассмотрим понятие сингулярности на примере двух теннисных мячей, летящих навстречу друг другу. Если мы попробуем описать их столкновение, исходя только из законов динамики (не учитывая законов упругости), то мы можем легко вычислить время соударения шаров. Запретив взаимопроникновение шаров, мы получим сжатие теннисных шаров при встрече в бесконечно тонкий и бесконечно плотный кружок. Такой кружок является двумерной сингулярностью. Появление сингулярности в расчетах в данном случае демонстрирует очевидную неполноту физической модели. Учет сил упругости легко приводит к ликвидации сингулярности и умеренной плотности в момент удара: мячи, сминаясь, передают свою кинетическую энергию в энергию упругого сжатия (резины и воздуха внутри), которая потом снова превращается в кинетическую энергию разлетающихся мячей и тепловую энергию, выделившуюся из-за некоторой неупругости соударения.

Таким образом, сингулярности в решении совсем не обязательно означают ущербность фундаментальных теорий, на которых эта модель базируется. Модели всегда расположены на стыке объективной теории и субъективного человеческого умения (или неумения) упрощать сложную реальность до простой системы. Когда гравитационист наталкивается в своих решениях на такую ужасную вещь, как сингулярность, то перед ним возникает выбор: или обвинить в появлении этой непристойности себя и свою неправильную или неточную модель, или переложить ответственность на общую теорию относительности и ее творца – Эйнштейна, который возразить уже не сможет. И часто побеждает желание отвести от себя обвинение. Мы воспротивимся этому желанию, от которого дурно пахнет отступлением, и рассмотрим в данной книге возможные решения проблемы сингулярности в рамках ОТО.

К сингулярной точке приводит сферически симметричное сжатие. Можно предположить, что отклонение от сферической симметрии решит проблему сингулярности. Е. М. Лифшиц (1915-1985) и И. М. Халатников (1919-2021) в 1963 году предприняли попытку решить проблему сингулярности и Большого взрыва в рамках классической теории Эйнштейна: они попробовали показать, что разлет вещества Вселенной (то есть, Большой взрыв) возможен после несимметричного коллапса и пролета частиц друг мимо друга. Так комета, падая на Солнце, чаще всего промахивается и снова улетает на окраины Солнечной системы.

Эта модель исходила из симметрии во времени траекторий движения частиц в поле тяготения. На самом деле, частица, падающая в гравитационном поле черной дыры, не может повторить свою траекторию после точки максимального сближения - гравитационное излучение отнимает у нее часть кинетической энергии и массы. Отсутствие гравитационных волн делало модель Лифшица-Халатникова слишком упрощенной. Эта модель могла бы стать более реалистичной, но ее развитию помешало увлечение физиков теоремами.

В 1965-1970 годах С. Хокинг и Р. Пенроуз доказали математическую теорему, согласно которым центральные сингулярности в теории Эйнштейна неизбежны при выполнении ряда условий, в том числе - закона сохранения энергии или

закона сохранения гравитационной массы. Теоремы Пенроуза-Хокинга больно ударили по надеждам физиков предотвратить сингулярности, не выходя за рамки теории Эйнштейна.

Теорема о том, что гравитация не выпускает вещество из околосингулярной области, сделала проблему сингулярности одной из острейших в космологии. В проблеме гравитационного коллапса волнуют не только бесконечная плотность и прочие расходимости в точке центральной сингулярности, где должны нарушаться все мыслимые законы, но и, в каком-то смысле, физическая неприличность процесса неизбежного коллапса. Ведь это необратимый феномен, из-за которого коллапсирующее вещество и сопутствующая информация выпадает из физической картины мира, и нет никакой возможности их вернуть. Это некрасиво, нелепо, и недаром многие физики, включая великого Эйнштейна и смелого Эддингтона с его великолепной интуицией, очень скептически относились как к неизбежности коллапса, так и к неотвратимости сингулярности, надеясь, что развитие физики предотвратит это «бедствие». Необратимое пожирание не только материи, но и информации, является характерной особенностью черной дыры. С точки зрения многих ученых, включая Хокинга, такая необратимость является информационным парадоксом.

После доказательства теорем Хокинга-Пенроуза распространилась точка зрения, что теория Эйнштейна, а, значит, и теоремы, основанные на этой теории, становятся неверными на финальной стадии гравитационного коллапса, когда вся масса коллапсирующего тела (массивной звезды или всей Вселенной) концентрируется в очень малом объеме. Основные надежды на ликвидацию сингулярностей возлагались на квантовые эффекты, которые развиваются на микроскопических расстояниях и могут «размазать» сингулярность. Квантовые флуктуации выходят из рамки ОТО и действия теорем Пенроуза-Хокинга.

Видимая безвыходность в проблеме сингулярности и Большого взрыва привела к тому, что ряд видных физиков стали утверждать, что в сингулярности пространство и время исчезает. Следовательно, до Большого взрыва пространства-времени не существовало, равно как его не будет и после Большого схлопывания – так иногда называют возможное сжатие нашей Вселенной в точку. Дж.Уилер даже предположил, что в момент

Большого взрыва рождается не только пространство и время, но и сами физические законы, которые даже подвержены своеобразной эволюции, напоминающей биологическую (J. A. Wheeler, K. Ford «Geons, Black Holes & Quantum Foam», 1998). Остается подивиться дерзости человеческого гения, который скорее уничтожит само пространство и время, чем признается, что пока не может найти правильное уравнение для динамики Вселенной в этом пространстве и времени. Многие видные физики не удовлетворяются таким кардинальным решением и продолжают констатировать наличие кризисной ситуации из-за сингулярностей в решениях, получаемых учеными из уравнений Эйнштейна.

Глава 4. Проблемы космологии Большого взрыва

*Мы живем, почти ничего не понимая в устройстве мира.
С. Хокинг (1990)*

4.1 Как вырваться из сингулярности или избавиться от нее?

Как ни велик был кризис в физике, разразившийся в 1911 году, сегодня гравитационный коллапс поставил физику перед лицом еще более грандиозного кризиса. Стоит вопрос не только о судьбе вещества, но и о судьбе самой Вселенной.

Ч. Мизнер, К. Торн и Дж. Уилер (1973)

Широко распространено мнение о том, что классические законы гравитации Эйнштейна на малых расстояниях должны превращаться в соответствующие квантовые законы. Но Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц отмечают: «Область применимости уравнений Эйнштейна самих по себе никак не ограничена со стороны малых расстояний или больших плотностей материи в том смысле, что уравнения не приводят в этом пределе ни к каким внутренним противоречиям (в отличие, например, от

классических уравнений электродинамики)» («Теория поля», 1973).

Возникает вопрос: как квантовые законы могут запретить гравитационную сингулярность? Как может смена классического описания на квантовое остановить или, более того, обратить вспять процесс коллапса гигантских масс, содержащих миллиарды миллиардов звезд, черных дыр и галактик? Известно, что квантовое описание в пределе постоянной Планка, стремящейся к нулю, должно превращаться в формализм классической физики. Квантовые эффекты обычно не противоречат классическим, а обогащают их, включая в себя как предельный случай. Трудно предположить, что переход от классического к квантовому описанию может изменить направление движения коллапсирующей звезды или всей сжимающейся Вселенной. Логично ожидать, что решение проблемы сингулярности должно находиться в рамках классических законов, или может быть принципиально понятно с позиций классической физики.

Авторитет теорем Пенроуза-Хокинга, которые, по общему мнению, запрещали решение проблемы сингулярности в рамках ОТО, очень высок, хотя и оспаривался в свое время учеными из СССР. Хокинг пишет: «Наша работа вызвала массу возражений, частично со стороны советских ученых, которые из-за приверженности «марксистской» философии верили в научный детерминизм, а частично и со стороны тех, кто не принимал саму идею сингулярностей как нарушающую красоту теории Эйнштейна. Но с математической теоремой не очень поспоришь...» («От большого взрыва до черных дыр», 1990).

Согласимся с Хокингом - с математической теоремой спорить нельзя, но отметим, что математика в данном случае применяется к физической модели гравитирующей системы, которая базируется на некоторых предположениях. Здесь бесспорность математических доказательств соединяется с сомнительностью физических допущений. Например, в свое время была доказана знаменитая математическая теорема об устойчивости планетных орбит Солнечной системы. Когда астрономы научились моделировать на компьютерах долговременную эволюцию орбит небесных тел, то оказалось, что наша планетная система достаточно неустойчива, а

доказанная теорема имеет слабое отношение к Солнечной системе, потому что в теореме были приняты предположения (например, исключены «немногочисленные» резонансные орбиты), которые сделали ее слишком далекой от реальности.

Поэтому стоит внимательно присмотреться к условиям применимости теорем Пенроуза-Хокинга. Р. Пенроуз говорит про теоремы о сингулярности следующее: «Теорема II... применима только к пространственнокомпактной вселенной, удовлетворяющей условию (неравенству), которое может выполняться и в реальной вселенной, но которое невозможно проверить путем наблюдений». «С учетом уравнений Эйнштейна..., требование P_{ν} является энергетическим условием..., которое (если еще $\lambda=0$) очень разумно с физической точки зрения» («Структура пространства-времени», 1972)

Если перевести это на общепонятный язык, то получится следующее: если принять некие определенные физические условия, которые выглядят «разумными», особенно если космологическая постоянная равна нулю (или антигравитация отсутствует), то мы получим, что Вселенная при коллапсе должна сжаться в точку с бесконечной плотностью и кривизной. Важнейшую оговорку про «определенные физические условия» часто игнорируют. На самом деле, полезные теоремы Пенроуза-Хокинга дают важный список таких условий, которые должны быть изучены, чтобы понять – какие из них в реальном мире могут нарушаться. Математические теоремы Пенроуза-Хокинга рассматривают как строгое доказательство неизбежности сингулярности в рамках ОТО, но, например, они не применимы к системам с антигравитацией или с положительной космологической постоянной, как отмечают сами авторы в совместной работе 1970 года.

Вообще говоря, открытие в конце XX века того факта, что Вселенная имеет космологическую постоянную больше нуля, уже делает условия, принятые в этих теоремах, достаточно сомнительными. А если будет доказано, что вблизи сингулярности возникает сильная антигравитация? Теоремы Пенроуза-Хокинга безусловно нарушаются при введении антигравитационного квантового поля возле сингулярности, но ситуация будет аналогичной, если антигравитация будет носить неквантовый характер.

Математические теоремы, доказанные в теоретической физике, имеют совсем другой уровень истинности, чем обычные теоремы Пифагора или Ферма. Математические теоремы в теоретической физике создают иллюзию строгости, гипнотически действуя на неискушенных физиков, но они не могут доказать реалистичность физической теории. Возможно, что ущерб, наносимый математическими теоремами в теоретической физике, перевешивает их пользу.

4.2 Что является пружиной Большого взрыва?

***В сингулярностях и катастрофических этапах эволюции вещества нет ничего страшного и невозможного, а есть только много непривычного.
Г. И. Наан***

Какой может быть природа квантового отталкивания возле сингулярности, которое может обеспечить Большой взрыв? Как классическое притяжение может смениться на квантовое отталкивание? Квантовый подход к решению проблемы сингулярности и Большого взрыва предполагает существование ранней Вселенной в квази-планковском микроскопическом масштабе, потому что на хорошо изученном макроуровне не существует сильного квантового отталкивания. С точки зрения квантовой космологии, динамику Вселенной, размером в десятки миллиардов световых лет, до сих пор определяют квантовые процессы неизвестной природы, случившиеся более десяти миллиардов лет назад в микрообъеме.

Это очень сильное предположение, как и вовлечение в физику ранее неизвестных квантовых полей. Какова же альтернатива? Где же найти решение проблемы сингулярности и Большого взрыва, которое базировалось бы на проверенной теории, и было бы неоспоримо?

Интересный феномен исследован в последние годы в общей теории относительности. Рассмотрим обычную классическую систему: два неодинаковых и неупругих

(например, пластелиновых) невращающихся шара, которые достаточно медленно движутся навстречу друг другу вдоль прямой линии. По Ньютону, если столкновение таких шаров рассмотреть в системе центра их масс, то после удара они слипнутся в один шар, который будет неподвижен относительно наблюдателя, который удобно устроился в центре инерции.

По логике Ньютона, столкновение и слияние двух неодинаковых черных дыр, которое наблюдается из центра масс, тоже должно приводить к одной покоящейся черной дыре. Но не тут-то было! Как показывают расчеты в рамках ОТО, при слиянии неодинаковых черных дыр, итоговая дыра не остается в центре масс системы, а получает толчок в сторону меньшей из дыр, и улетает из центра масс системы. Физику этого толчка можно интерпретировать следующим образом: каждая черная дыра имеет вокруг себя воронку гравитационного потенциала. Меньшая дыра имеет меньшую воронку, а большая дыра, соответственно, более масштабную воронку. При слиянии дыр образуется одна суммарная воронка потенциала, которая оказывается несимметричной из-за разных потенциальных воронок неодинаковых сливающихся черных дыр, и из-за того, что гравитационное поле перестраивается не мгновенно, а со скоростью света. Можно сказать, что образовавшаяся суммарная дыра оказалась в несимметричной воронке или не в минимуме итогового потенциала, а на его склоне – и этот склон потенциала выталкивает суммарную черную дыру из центра масс. Максимальная скорость такой «отдачи» для невращающихся дыр – 175 км/сек, если масса крупной дыры в пять раз больше, чем у меньшей дыры. Очевидно, что итоговая черная дыра ускоряется искривленным пространством-временем, потому что в данной системе нет других сил.

Этот эффект не имеет аналогов в ньютоновской гравитации, в которой гравитационный потенциал перестраивается мгновенно. Феномен «отдачи» в ОТО хорошо изучен за последние годы и даже применяется для объяснения вылета черных дыр из шаровых скоплений и галактик. Но принципиальная значимость этого эффекта гораздо глубже. Общепринято, что гравитационная сила является притягивающей силой. Гравитация – это синоним слова «притяжение». Слово

«антигравитация» в науке и культуре часто носит иронично-негативный оттенок, вплоть до диагноза.

Проведем следующий мысленный эксперимент. Возьмем большое количество черных дыр звездной массы и равномерно расположим их по поверхности сферы, например, в сто световых лет (см. рис.1).

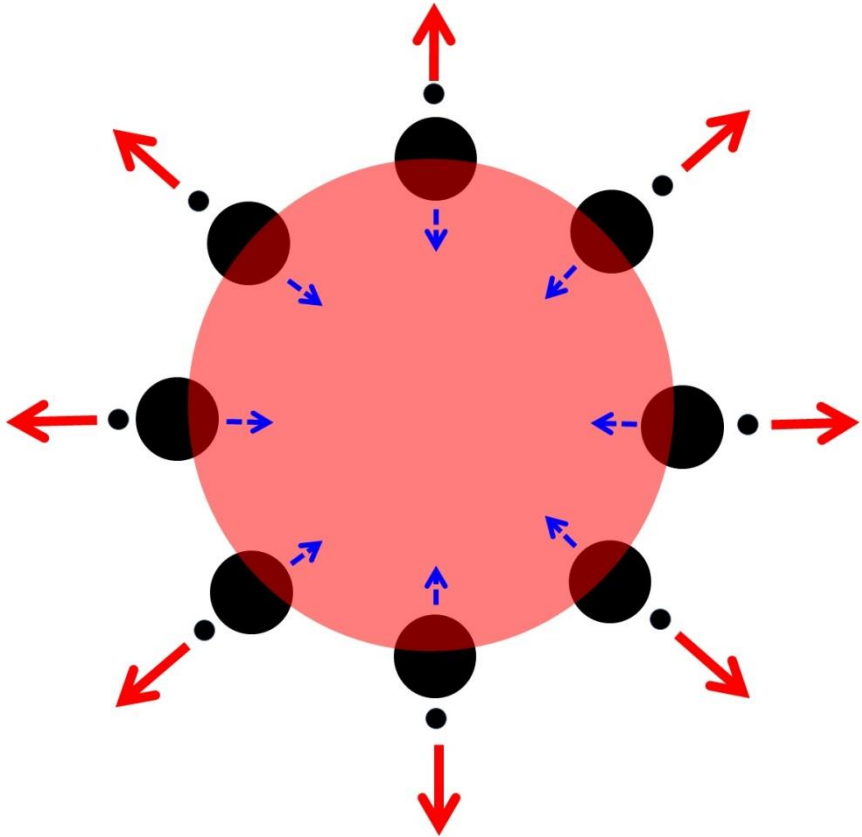


Рис.1. Антигравитация сферы из двойных дыр. До слияния больших и маленьких дыр, в системе действует притягивающая гравитация (штрихованные стрелки), которая заставляет сферу медленно сжиматься. После слияния мелких и крупных дыр, сфера начинает быстро разлетаться в разные стороны (сплошные стрелки) на волне антигравитационного потенциала, вычисляемого в рамках ОТО.

Эта конструкция будет обладать заметной самогравитацией. Если отпустить черные дыры, то они начнут падать с небольшим ускорением к центру сферы. Разместим возле каждой черной дыры еще одну дыру в пять раз меньшей массы – так, чтобы меньшая дыра располагалась снаружи, то есть, на продолжении линии «центр сферы – крупная дыра». Притяжение дыр к центру сферы только усилится. Если же разрешить слияние каждой пары черных дыр, то произойдет, с точки зрения теории Ньютона, нечто невероятное (см. рис.1): сфера из суммарных черных дыр, вместо сжатия, начнет расширяться со скоростью почти двести километров в секунду! Мы сумели так расположить систему гравитирующих объектов, что градиент потенциала для всех дыр, возникших после слияния, оказывается направленным внутрь – и вместо притяжения (= гравитации) мы получили отталкивание (=антигравитацию). Этот мысленный эксперимент полностью разрушает прочно устоявшееся мнение, что гравитация – это синоним притяжения. Мы получили в рамках ОТО антигравитацию, не вводя никаких новых сил, квантовых полей или гипотетических отрицательных давлений! Эта разлетающаяся сфера из черных дыр - светлый луч надежды в царстве темных сил.

Можно задаться логичным вопросом: а можно ли вывернуть воронку притягивающего потенциала так, чтобы он стал отталкивающим в момент коллапса Вселенной? Если гравитация становится в околосингулярной области мощнее всех остальных сил, то нельзя ли победить гравитационный коллапс и сопутствующую сингулярность с помощью самой гравитации?

Глава 5. Проблема темной материи

5.1 Фриц Цвикки и невидимая масса в скоплениях галактик

*Если это подтвердится, то мы
придем к поразительному выводу —
что количество темной материи
гораздо больше, чем светящейся.
Ф. Цвикки (1933)*

Фриц Цвикки (1898-1974) вырос в Европе и закончил Цюрихский политехнический институт, где раньше учился Альберт Эйнштейн. В 1925 году Цвикки уехал в Калифорнию, где располагались Маунт-Вильсоновская и Паломарская обсерватории. За последующие двенадцать лет Фриц Цвикки получил множество научных результатов, которые поставили его в ряд величайших астрономов XX века. Но в своих открытиях он настолько опережал свое время, что коллеги его часто не понимали. Поэтому Фриц Цвикки жил в состоянии острого конфликта с научным сообществом. Один из очевидцев вспоминал: «окружающие видели в нем сумасшедшего, а он их считал глупцами». В результате у Цвикки, который нисколько не скрывал своего мнения о коллегах, возникали проблемы с публикациями трудов, с признанием его приоритета и с получением наблюдательного времени на крупнейших телескопах с диаметром в 2.5 и 5 метров.

Важнейшим открытием Фрица Цвикки является объяснение в 1934 году (вместе с Вальтером Бааде) механизма взрыва сверхновых звезд. Цвикки и Бааде предположили, что в какой-то момент эволюции массивной звезды, гравитация преодолевает давление раскаленной материи, и ядро массивной звезды быстро схлопывается в плотный нейтронный шар размером около десяти километров. При этом выделяется столько энергии, что внешняя оболочка звезды разлетается в разные стороны, выпуская наружу мощное световое излучение, которое можно заметить на расстоянии даже миллиардов световых лет. На месте взрыва Сверхновой остается маленькая по размеру нейтронная звезда. Эта работа Цвикки-Бааде оказала на астрофизику и космологию огромное влияние. Спустя тридцать три года предсказание Цвикки и Бааде о существовании нейтронных звезд смогла подтвердить Джоселин Белл, открывшая в 1967 году пульсары, которые представляют собой нейтронные звезды с сильным магнитным полем. С тех пор пульсары являются важнейшим объектом для исследователей. В частности, движение двойного пульсара доказало существование гравитационных волн и подтвердило теорию Эйнштейна, за что Дж. Тейлору и Р. Хюлзу была присуждена Нобелевская премия 1993 года. Статью Цвикки-Бааде 1934 года о сверхновых, нейтронных звездах и космических лучах нобелевский лауреат Кип Торн назвал

«одним из самых пророческих документов в истории физики и астрономии». Астроном Цвикки нашел в небе 129 сверхновых звезд, установив этим рекорд. Телескопы, снабженные компьютерами, довели к концу двадцатого века число открытых сверхновых до многих тысяч. Четыре Нобелевские премии по физике были присуждены за работы, связанные с нейтронными звездами и сверхновыми. Более четверти миллиона научных статей опубликовано о сверхновых, название которым придумали Цвикки и Бааде.

В 1937 году Цвикки высказал важнейшую идею о гравитационном линзировании на галактиках (см. иллюстрации 3 и 4). Но самым интригующим и важным открытием Цвикки стало доказательство существования «темной материи». В 1933 году он опубликовал исследование скоростей скопления галактик в созвездии Волосы Вероники. Зная скорости движения отдельных галактик, Цвикки с помощью закона гравитации Ньютона вычислил массу всего скопления: ведь в стабильном скоплении скорости движения галактик не должны превышать скорость убегания из системы, которая задается массой всего скопления.

Общую массу галактического Скопления Волос Вероники Цвикки оценил и вторым способом — подсчитав видимое количество галактик в скоплении и умножив его на типичную массу галактики. Оказалось, что суммарная масса видимых галактик в сотни раз меньше, чем масса скопления, полученная из изучения скоростей движения галактик. Цвикки сделал вывод, что основная масса вещества в Скоплении Волос Вероники является невидимой для наблюдателя — он назвал ее «темной материей». И хотя, после уточнения значения постоянной Хаббла, соотношение между невидимой и видимой массой скопления уменьшилось, общий вывод Цвикки о доминировании темной материи был бесспорен.

До Цвикки такие астрономы и ученые, как Герман Гельмгольц, Анри Пуанкаре, Джеймс Джинс, Якобус Каптейн и Ян Оорт, изучали возможность наличия в нашей Галактике темной материи. Но только после убедительных работ Цвикки существование невидимой составляющей космоса можно было считать доказанным. Это открытие, как и другие результаты Цвикки, долго не получало должного признания. Новым этапом в

проблеме «темной материи» стали работы Веры Рубин и ее соавторов.

5.2 Вера Рубин и вращение галактик с темным гало

*В настоящее время, «мы не знаем»
- есть единственно честный ответ
на вопрос, что такое темная
материя.*

Вера Рубин (1992)

Подтвердить существование феномена темной материи на уровне отдельных галактик и привлечь к нему всеобщее внимание смогла Вера Рубин (1928-2016), астроном из Вашингтона. Научным руководителем диссертации Веры Рубин был Георгий Гамов. Родители Веры тоже были иммигрантами из бывшей Российской империи: мать из Бессарабии или Молдовы, отец — из Литвы. В середине 1960-х годов Вера Рубин стала первой женщиной, которую пригласили в Паломарскую обсерваторию, чтобы вести наблюдения на ее телескопах. В течение нескольких лет Вера Рубин вместе со своим соавтором Кентом Фордом, который изобрел очень чувствительный спектрограф, изучала движение звезд вокруг центров галактик, в первую очередь – Туманности Андромеды. Рубин вспоминала трудности наблюдений на обсерватории Лоуэлла в 1967-1968 годах: приходилось работать на телескопе в полной темноте, ухитряясь на ощупь вырезать фотопластинки нужного размера. Вместе с Фордом они применяли все способы для повышения чувствительности пластинок. Например, Рубин упоминала такой удивительный рецепт: «Нагревание фотопластинки в духовке в течение 72 часов волшебным образом повышало ее чувствительность». Самый первый спектр края туманности Андромеды был случайно уничтожен – доброволец, который вызвался промыть готовую пластинку, поместил ее не в холодную, а в горячую воду и смыл всю фотоэмульсию со стекла.

Вера Рубин стала опытным специалистом в анализе звездных спектров и их изменений из-за эффекта Доплера, связанного с движением светил (см. книгу Vera Rubin “Bright Galaxies Dark Matters”, 1997). Тема была важной, но не сулила

каких-то сенсаций — может, именно поэтому Вера за нее взялась. Она признавалась, что не любит проблем, где наблюдатели теснятся, как в переполненном вагоне. Все астрономы заранее были уверены, что звезды вокруг галактических центров должны двигаться в полном соответствии с ньютоновскими законами, которые в случае, например, движения планет в Солнечной системе, приводят к закону Кеплера: линейная скорость движения тела по орбите падает с ростом радиуса орбиты по закону $1/\sqrt{R}$. Следовательно, увеличение расстояния от центра галактики в 4 раза должно приводить к уменьшению скорости орбитального движения звезд в 2 раза. Но результаты, которые получила Рубин и Форд, оказались сенсационными — звезды не подчинялись закону Кеплера и двигались примерно с одинаковой скоростью на самых различных расстояниях. Словно каждую галактику обнимало массивное облако темной материи, которая весило гораздо больше звездного диска галактик — и заставляло звезды двигаться быстрее, чем им предписывало притяжение суммарной массы всех видимых звезд.

Отметим, что речь идет о равенстве линейных (или обычных) скоростей звезд на разных радиусах, что предполагает достаточно интенсивное дифференциальное вращение галактики. Твердотельное вращение достигается при постоянной, не зависящей от радиуса, угловой скорости. В этом случае линейные скорости не являются постоянными, а растут, при постоянной угловой скорости, пропорционально радиусу. Спиральный узор в дифференциально-вращающихся галактиках движется твердотельно, потому что он представляет собой волну, распространяющуюся в дифференциально-вращающемся газопылевом диске достаточно независимо от движения самого диска. Так волны от катера неподвижны для пассажиров на нем, несмотря на течение реки.

Результаты Рубин и Форда быстро были подтверждены на десятках галактик, на краю которых наблюдалось сильное отклонение от кеплеровского вращения. Линейная скорость вращения часто даже росла с увеличением радиуса.

Вдобавок теоретики показали, что спиральные галактики без массивного гало были бы неустойчивы. В начале 1980-х годов я участвовал в многочисленных семинарах, где

обсуждались устойчивости галактических дисков и модели генерации спиральных волн. Изложения таких моделей всегда начиналось с предположения массивного сферического гало вокруг плоской спиральной галактики (см., например, В.Л. Поляченко и А.М. Фридман «Устойчивость гравитирующих систем», Наука, 1976).

Когда ученые убедились в справедливости результатов Цвикки, Рубин, Форда и других ученых, то начались интенсивные наблюдательные и теоретические исследования природы этой темной материи. Из чего она состоит? Как распределена в настоящее время? Как эволюционировала с момента Большого взрыва?

5.3. Поиски темной материи среди белых карликов и черных дыр.

Отсутствие полной ясности в вопросе о скрытой массе, возможно, продолжится еще 5-10 лет.

Я.Б. Зельдович (1983)

Из чего сделана темная материя? ...если она барионная, то может состоять из малозаметных коричневых карликов, маленьких звезд, которые никогда не станут горячими настолько, чтобы начались обычные ядерные реакции. Или из большой популяции необнаруженных белых карликов. Или из невероятного количества холодных планетоподобных объектов. Или из миниатюрных черных дыр. Или даже из огромных черных дыр – остатков ранней вселенной.

Вера Рубин (1989)

Поиск темной материи начался с естественного предположения, что астрономы пропустили в космосе какие-то невидимые объекты — например, темные облака холодного газа или мелкие слабосветящиеся звезды вроде белых карликов с солнечной массой или коричневых карликов размером с Юпитер, но массой в десятки раз больше, чем у него. Важным открытием в этом направлении стало обнаружение межгалактических холодных облаков, состоящих из водорода и гелия, — они имеют температуру около нуля градуса в Кельвинах и очень прозрачны, поэтому свет звезд легко сквозь них проходит. Лишь спектральные линии, которые межгалактический водород выгрызает в звездных спектрах, выдают такие невидимые облака. Их масса в скоплениях галактик оказалась в десять раз больше, чем масса всех звезд. Но этого все равно было недостаточно, чтобы объяснить оценки Цвикки количества темной материи в скоплении галактик.

Может, темная материя состоит из крошечных - в несколько километров, - но очень массивных объектов, таких как нейтронные звезды и черные дыры звездных масс? Астрономы разработали специальную наблюдательную программу для поиска белых, красных и коричневых карликов, нейтронных звезд и черных дыр, которую назвали «МАСНО» (Massive Astrophysical Compact Halo Object). Совместными усилиями астрономов и космических телескопов в нашей Галактике было открыто огромное количество слабосветящихся звезд — они стали самой многочисленной звездной компонентой Млечного Пути. Но их массы тоже оказалось мало для нужного увеличения массы нашей Галактики. Гравитационное линзирование было самым подходящим методом для поиска черных дыр и нейтронных звезд. В проектах МАСНО и EROS2 (Experience de Recherche d'Objets Sombre) телескопы наводились на локальные (до 100 квадратных градусов) участки неба в Магеллановых Облаках, чтобы поймать расщепление света их звезд на черных дырах (и других компактных объектах),двигающихся в гало Млечного Пути. Группа МАСНО наблюдала в течение нескольких лет около 12 миллионов звезд Большого Магелланова Облака и к 2000 году нашла 13-17 случаев микролинзирования, сделав вывод, что невидимые тела солнечных масс могут отвечать за 20% от массы темной материи.

Группа EROS2, проанализировавшая 33 миллиона звезд, не подтвердила эти результаты и не нашла такого количества темных гравитирующих тел. Был сделан вывод, что черных дыр и нейтронных звезд недостаточно, чтобы объяснить феномен темной материи.

Это заключение было поддержано теоретиками, которые доказывали, что Большой взрыв не может породить столько барионов, чтобы из них можно было создать объекты МАСНО в достаточном для объяснения темной материи количестве.

После этих весьма противоречивых наблюдений и теоретических возражений, астрономы решили, что МАСНО звездных масс слишком мало для объяснения загадки «темной материи». Забегая вперед, отметим, что это было серьезной ошибкой.

В качестве альтернативы темной материи, израильский физик Мордехай Милгром в 1983 году опубликовал гипотезу модифицированной ньютоновской динамики: Modified Newtonian Dynamics (MOND). Согласно этой гипотезе, ньютоновское притяжение для слабого гравитационного потенциала на краю галактик падает как $1/R$ - медленнее, чем зависимость в классической теории $1/R^2$. То есть, Милгром изменил закон гравитации, который действует на масштабах галактики и всей Вселенной. Это позволяло обойтись без темной материи, но цена такого решения была велика: отказ от проверенной и красивой теории Эйнштейна-Ньютона.

В теории MOND гравитационные силы оказываются привязанными к видимой материи. Противники MOND указывают на скопление галактик с названием «Пуля» как на доказательство реальности темной материи, отделяемой от видимой материи (иллюстрация 5). Скопление Пуля представляет собой результат лобового столкновения двух скоплений галактик. Если посмотреть на изображение скопления Пуля в рентгеновском диапазоне, а потом наложить на него распределение реальной массы, полученное по гравитационному линзированию (см. иллюстрацию 5), то окажется, что газовая составляющая скоплений затормозилась при лобовом соударении. Облака темной материи, которые не могут взаимодействовать друг с другом через столкновения из-за малого размера составляющих их тел, продолжили движение и

значительно оторвались от видимой материи. Пространственное разделение темных и светлых масс скоплений (см. также иллюстрацию б), является весомым доказательством того, что темная материя представляет собой вещество:

- отдельное от видимой материи;
- более массивное;
- имеющее меньшее сечение рассеяния, чем обычное вещество.

Проблема поиска темной материи оказалось одной из труднейших в астрономии и космологии.

Глава 6. Волшебство квантовой космологии

*После 1973 года жизнь физиков, специализирующихся на элементарных частицах, стала намного труднее по мере накопления свидетельств того, что их исследованиям угрожает опасность стать жертвой собственного успеха.
Питер Войт (2006)*

*Число специалистов, которые тем или иным образом вовлечены в занятия космологией, приближается к нескольким тысячам.
Михаил Сажин (2002)*

*Если инфляция права, все может возникнуть из ничего или, по крайней мере, из очень малого. Если инфляция права, вселенная может быть названа, в конечном счете, бесплатным обедом.
Алан Гус (2002)*

Космология до 80-х годов развивалась по стандартному научному сценарию: физики, опираясь на фундамент общей теории относительности, хорошо подтвержденной экспериментами, строили «дом», то есть модель Вселенной. Но трудности в построении такой модели казались многим ученым непреодолимыми: никак не находился механизм Большого взрыва, не решались проблемы сингулярности и темной материи. И тогда появились смелые люди, которые решили строить дом не с фундамента, а с крыши. Они сделали набор предположений *«ad hoc»*, что на латыни означает «специально для этого», «по особому случаю» - именно таких гипотез, которые позволяли построить логичную модель Вселенной, но которые не имели нужного основания в виде фундаментальной теории (такое название говорит само за себя). Можно сказать, что эти смелые космологи вооружились квантовой волшебной палочкой, которая сделала их всемогущими. Конечно, такой подход тоже требовал значительных усилий – нужно было подобрать такие параметры введенных гипотетических сущностей, чтобы они сумели объяснить наблюдаемую картину Вселенной. Безусловно, дом, начатый с крыши, не должен висеть в «воздухе» долго, поэтому эти «волшебные» решения сопровождалось надеждами, что квантовая теория гравитации вскоре подведет под все эти гипотезы прочную базу. Отметим, что в истории науки и квантовой механики было немало случаев, когда для решения тех или иных проблем вводились гипотетические объекты, которые потом открывались в эксперименте. Например, в 1928 году П.А.М. Дирак на основе решения квантового уравнения предсказал существование позитрона – античастицы электрона, которая была открыта в 1932 году. В 1930 году Вольфганг Паули, чтобы спасти закон сохранения энергии при бета-распаде, ввел гипотетическую частицу нейтрино, которую обнаружили только в 1956 году. То есть деяния «квантовых волшебников» имели под собой определенные основания. Рассмотрим детальнее основные элементы квантовой космологии, созданной таким способом.

6.1 Чудесный инфлатон как причина Большого взрыва одноразовой Вселенной

*Негативная энергия фальшивого
вакуума, следовательно, создает*

отталкивающее гравитационное поле, которое является движущей силой инфляции.
Алан Гус (2002)

Какой бы могучей не являлась гравитация в околосингулярной области, всегда можно предположить, что там существует неизвестное отталкивающее поле, которое преодолевает гравитацию. Так как это поле не следует из законов физики, а рождено лишь желанием победить сингулярность и вырвать Вселенную из ее цепких объятий, то оно может быть как угодно сильным – ведь фантазиям (или гипотезам вне существующих теорий) нет никаких преград. Если строить самый простой вариант одноразовой Вселенной, которая когда-то взорвалась, то достаточно постулировать существование одноразового антигравитационного поля, которое потом нигде не будет проявляться в современных наблюдениях.

В 1981 году Алан Гус опубликовал статью о квантовой инфляционной модели Вселенной, где предположил наличие «инфлатона» - квантового поля, которое обеспечивает ускоренный разлет Вселенной из точки сингулярности – то есть, является пружиной Большого взрыва. Предполагалось, что это поле обладает огромным отрицательным давлением, которое и вызывает антигравитацию. Введение такого квантового поля выводит рассмотрение за пределы теорем Пенроуза-Хокинга. Согласно Гусу, Вселенная зародилась в ходе фазового перехода «ложного» вакуума в «истинный», в ходе которого она сначала стремительно охладилась, а потом снова нагрелась. Детали этого процесса настолько неясны, что С. Хокинг характеризует этот краеугольный камень теории инфляции как «сомнительный фазовый переход». Появление Вселенной Гус назвал «бесплатным обедом», потому что ее масса предполагалась равной нулю, и рост положительной энергии вещества должен был полностью компенсироваться ростом отрицательной гравитационной энергии (при этом все сложности и тонкости, связанные с нетензорностью гравитационной энергии, грубо игнорировались). Вселенная перед периодом инфляции имела размер 10^{-54} см и возраст 10^{-37} секунды (Alan Guth “The Inflationary Universe”, 1997). Инфлатон ускоренно расширял эту

крошечную Вселенную до возраста в 10^{-35} секунды, успев увеличить ее примерно до метрового размера. Такое колоссальное (на 56 порядков) увеличение в размере делало Вселенную практически плоской и однородной: все неоднородности, включая начальную кривизну, выглаживались и растягивались. Тем не менее, квантовые флуктуации в микроскопической Вселенной предполагались как раз такими, чтобы они стали зародышами будущих галактик.

После периода инфляции, Вселенная, надутая до размеров большой тыквы, продолжала расширяться уже по инерции, без ускорения, потому что квантовый инфлатон, мгновенно сделав свое дело, волшебным образом выключался. Такое одноразовое «волшебство» не годилось для построения модели циклической Вселенной, потому что для нее нужно было антигравитационное поле, надежно возникающее в момент каждого максимального сжатия Вселенной. Поэтому, циклическая модель оказалась оттесненной на обочину квантовой космологии. Зато теория космологической инфляции была с энтузиазмом подхвачена представителями физики элементарных частиц и квантовых полей, которые в 1970-х годах активно искали новые области применения для своих сил, так как успешно разработанная Стандартная модель элементарных частиц оставила без работы всех создателей альтернативных моделей. Теория инфляции предоставляла новое широкое поле деятельности, потому что там можно было задавать разные потенциалы инфлатона – и получать все новые и новые модели расширяющейся Вселенной.

6.2 Неуловимые ВИМПы как кандидаты в темную материю

Мы создаем гигантское количество новых теорий, и ни одна из них никогда не была подтверждена экспериментально.

Сабина Хоссенфельдер (2020)

Природа темной материи стала еще одной проблемой, к решению которой приступили квантовые космологи, воодушевленные первыми победами. По имеющимся тогда данным, известные объекты, вроде белых карликов и черных

дыр, не смогли объяснить темную материю, поэтому космологи, вышедшие из физики элементарных части, привычно к ним и обратились. В начале 80-х годов перспективным кандидатом на роль «темной материи» казались нейтрино, которых вокруг нас очень много, например, через человеческий глаз каждую секунду пролетают сотни миллиардов нейтрино, рожденных на Солнце. Они так слабо взаимодействуют с веществом, что легко пролетают насквозь и человека, и Землю. Но масса нейтрино оказалась такой крошечной, что вскоре стало ясно: сильно повлиять на массу Вселенной эта элементарная частица не в состоянии. Когда ученые попробовали рассчитать, какими скоростями должны обладать частицы темной материи, чтобы с их помощью можно было объяснить наблюдаемое вращение и структуру галактики, то оказалось, что они должны двигаться сравнительно медленно, со скоростями в сотни километров в секунду, образуя сферические гало вокруг галактик. То есть, темная материя должна быть «холодной». «Горячие» нейтрино, которые движутся почти со скоростью света, на роль такой «холодной» темной материи никак не годились: галактики не смогли бы удержать возле себя такие быстрые частицы.

Значит, «темная материя» может состоять из медленных элементарных частиц, которые достаточно массивны (или их очень много), но они не регистрируются, потому что слабо взаимодействуют с веществом. Проблема была в том, что таких частицы никто не наблюдал, и они не предсказывались из Стандартной теории элементарных частиц, которая превосходно подтверждается экспериментами. Но квантовых космологов это не смутило, потому что у них была волшебная палочка, с помощью которой была введены в обиход гипотетические слабо взаимодействующие массивные частицы, которые назвали ВИМПами (WIMP = Weakly Interacting Massive Particles). Чтобы объяснить феномен темной материи, популяция этих неуловимых частиц по суммарной массе должна превосходить мировую массу барионов в 5 раз! То есть, речь идет не о какой-то мелкой примеси к мирозданию, а об его основной компоненте. Странно и то, что это превосходство ВСЕГО в пять раз, потому что никакой связи между ВИМПами и барионами быть не должно: они могут различаться по суммарной массе на десятки порядков, и тогда отчего такое совпадение?

Глава 7. Проблема темной энергии

*Мы летим в никуда верхом на бессмысленном взрыве. Это описывается только невидимой злобной антигравитацией, так называемой Темной Силой.
Джон Андайк «Ускоряющееся расширение Вселенной» (2004)*

*Это величайшая проблема в теоретической физике.
Майкл Турнер*

7.1 Ускорение расширения Вселенной.

*Открытие темной энергии является полным сюрпризом с точки зрения большого взрыва и инфляционной космологии.
П. Стейнхардт и Н. Турок (2003)*

*Странные дела происходят в науке почему-то каждый раз в начале века.
Л. Ксанфомалити (2005)*

В 1998 году две группы наблюдателей во главе с Солом Перлмуттером, Брайаном Шмидтом и Адамом Риссом опубликовали сенсационные результаты о расширении Вселенной. Астрономы усовершенствовали метод измерения больших космических расстояний по вспышкам сверхновых и обнаружили, что Вселенная расширяется с ускорением. За эти результаты Перлмуттеру, Шмидту и Риссу присудили Нобелевские премии по физике за 2011 год.

То, что Вселенная расширяется не с замедлением, как следует из общепринятой космологической модели, а с

ускорением, предельно обострила проблему понимания динамики Вселенной. Ученым пришлось признать, что на больших масштабах во Вселенной царит не ожидаемое притяжение из-за гравитации многочисленных галактик, а неожиданное отталкивание вследствие какой-то загадочной антигравитации. При этом сила отталкивания, управляющая Вселенной на больших расстояниях, в два раза превосходила силу притяжения между галактиками. Следуя моде на темные сущности, эту силу отталкивания назвали «темной энергией».

Открытие ускорения Вселенной было шоком для космологов-теоретиков, включая создателя инфляционной теории А. Гуса, который признался: «Это здорово ошеломило меня» (цитируется по К. Пауэлл «Бог в уравнениях», 2002).

Обнаруженная антигравитация хорошо описывается феноменологической космологической постоянной, введенной еще Эйнштейном в 1917 году. Но в чем физическая причина появления этой антигравитации? Несмотря на удивительность факта ускорения Вселенной, логично предположить, что этот феномен должен быть решен в рамках общей модели Большого взрыва, и что загадочность ускорения расширения тесно связана с непониманием причин самого расширения. В пользу этого говорит и новое совпадение: величина темной энергии в два раза больше притяжения между галактиками, которое задается, в основном, темной материей, на первый взгляд никак не связанной с современным ускорением Вселенной.

7.2 Отрицательное давление квантового вакуума - новая теория эфира?

Открытие темной энергии было сделано астрономическими методами и стало для большинства физиков полной неожиданностью. Темная энергия, пожалуй, главная загадка современного естествознания.

Подчеркнем, что однородность в пространстве и постоянство во времени — это точные, а не

приближенные свойства вакуума. Плотность энергии вакуума — это мировая константа (по крайней мере, в той части Вселенной, которую мы наблюдаем).

Академик В. Рубаков

С начала XVII века до конца XIX века подавляющее большинство ученых полагало, что свет — это волны, распространяющиеся в эфире, невидимой и неосязаемой среде. Чтобы служить проводником для света и при этом быть необнаружимым, например, не влиять на движения планет, эфир должен был обладать очень парадоксальными свойствами. Изучением этих свойств занимались ведущие физики и математики мира: О. Коши (1789-1857), У. Томсон (1824-1907), Х. Лоренц (1853-1928), А. Пуанкаре (1854-1912) и даже такие химики, как Д. Менделеев (1834-1907). Скорость колебаний зависит от твердости тел, и в XIX веке было показано, что скорость световых волн свидетельствует о необычайной твердости эфира. Как это может быть совместимо с практической неосязаемостью эфира? Английский математик, создатель современной гидродинамики, сэр Дж. Стокс (1819-1903), полагал, что эфир подобен смоле: для быстрых движений, вроде распространения света, он ведет себя как твердое тело, а для медленных движений планет вокруг звезд (или для размахивания руками) он очень пластичен. Ученые триста лет закрывали глаза на такие патологические свойства эфира, которые резко противоречили всему опыту физики. Отметим, что с самого начала не было никаких прямых экспериментальных свидетельств в пользу существования эфира. Он был введен *ad hoc*, то есть только для того, чтобы подвести теоретическую базу под распространение света. Эксперимент Майкельсона-Морли в 1887 году по измерению скорости света относительно движения Земли, должен был показать, что свет вдоль орбиты Земли и поперек ее распространяется с разной скоростью. Эксперимент, наоборот, показал, что никакой разницы в скорости света нет. Это был смертельный удар по теории эфира.

Когда в 1998 году было открыто ускорение расширения Вселенной, то тоже срочно потребовалось подвести под нее

теоретическое объяснение. Так как квантовая космология стала научным мейнстримом, то в ход была пущена привычная квантовая волшебная палочка (возможно, возникла уже психологическая зависимость от этого могущественного инструмента). Было предложено, что вакуум нашей Вселенной, благодаря квантовым флуктуациям виртуальных частиц, обладает слабым отрицательным давлением (конечно, именно таким, какое может объяснить положительную космологическую постоянную). Это загадочное антидавление, вставленное в уравнение Эйнштейна, вызывало нужную антигравитацию. Как и в теории эфира, не было никаких прямых экспериментальных указаний на такое вакуумное отрицательное давление. Более того, не было никаких и теоретических аргументов в пользу такого давления, лишь надежды на будущие теории, вроде теории струн или квантовых теорий гравитации. Ссылки на эффект Казимира (притяжение в вакууме двух близких пластин), как на пример вакуумного отрицательного давления, оказались не убедительны. Во-первых, этот эффект, как показал в 2005 году в журнале *Physical Review* физик Р. Джаффе из Массачусетского технологического института, может интерпретироваться без привлечения вакуумных флуктуаций, тем самым он не может служить обоснованием «темной энергии» в космологии. Во-вторых, эффект Казимира хорошо изучен теоретически и измерен экспериментально в лабораторных условиях. Почему же, попытки простой экстраполяции этого эффекта на масштабы Вселенной приводят к ошибке на 120 порядков?

Шон Кэррол пишет в обзорной статье «Почему Вселенная ускоряется?» (2004): «Судя по всему, Вселенная ускоряется, но причины этого — полная загадка. Самое простое объяснение - малая энергия вакуума (космологическая постоянная), поднимает три трудных вопроса: почему энергия вакуума так мала, почему она не совсем равна нулю и почему она сравнима с плотностью материи сегодня».

Инфляционная теория считает темную материю газом из массивных частиц, а темную энергию — свойством самого вакуума. Темная материя, тормозящая расширение Вселенной, и темная энергия, ускоряющая это разбегание, физически никак не связаны и должны по-разному зависеть от размера Вселенной: вакуум, естественно, будет сохранять свои свойства, а средняя

плотность темной материи — быстро уменьшаться из-за роста объема Вселенной. С момента возникновения реликтового излучения во Вселенной возрастом в 380 тысяч лет плотность темной материи упала в десятки триллионов раз и продолжает падать. Возникает проблема, которую Шон Кэррол назвал «скандальным совпадением»: почему в настоящее время влияние темной энергии всего в два раза больше влияния темной материи? Некоторые физики пытаются сделать темную энергию зависящей от времени и установить связь между ней и переменной темной материей, хотя изначально эти сущности были введены как совершенно независимые. Попытки установить такую связь приводит к новым нагромождениям гипотетических эффектов в квантовых моделях Вселенной.

Согласно модели будущего доминирования космологической постоянной, наша Вселенная обречена на «долгую холодную смерть», как сказал Б. Шмидт. Интересно, что современная квантовая космология пессимистично предсказывает смерть Вселенной, близкую к старинной концепции «тепловой смерти» Клаузиуса!

Глава 8. Кризис квантовой модели Вселенной

*Во что веришь по-настоящему,
это и существует.
Джеймс Джойс «Улисс»*

*Учитывая правдоподобие вечной
инфляции, я считаю, что скоро
любая космологическая теория, не
ведущая к вечному размножению
вселенных, будет считаться
невероятной, как вид бактерий,
которые не могут размножаться.
Алан Гус (1997)*

Подытожим вышесказанное. С начала 1980-х годов активно развивается концепция, по которой Вселенная является квантовым объектом, динамика которого, с самого рождения до настоящего времени, определяется такими гипотетическими

квантовыми феноменами, как поле инфлатона, элементарные частицы ВИМПы и отрицательное давление вакуума. Все используемые в квантовой космологии сущности были введены без каких-либо серьезных теоретических или экспериментальных обоснований, но с большой надеждой на их получение в будущем. Прошло сорок лет после «взрывного» распространения этой инфляционной концепции, так что уже можно подвести определенный итог ее обоснованности.

8.1 ВИМПы для темной материи: не найдены

Интенсивные поиски WIMP большим количеством подземных экспериментов могут привести к их обнаружению в ближайшие годы, или практически исключить существование этих частиц...

Ю. Куденко («Троицкий вариант», 13 сентября 2011)

Гипотеза, что черные дыры — это темная материя, не исключена, но сейчас столбовая дорога по объяснению существования темной материи — новые частицы.

— Какой массы они могут быть?

— Любой.

Академик И. Ткачев отвечает на вопросы Б. Штерна («Троицкий вариант», 7 декабря 2021)

Следуя предсказаниям квантовых космологов (так как они были очень неконкретными – фактически «любыми», то их вернее назвать предчувствиями), уже несколько десятилетий подряд физики повсюду ищут ВИМПы - неуловимые частицы темной материи.

В разных странах организовано около десятка подземных лабораторий, которые спускают многотонные детекторы в шахты на глубины до двух километров, в надежде зарегистрировать там

загадочные частицы. Но ничего не получается. Детекторы темных частиц запускаются на воздушных шарах над Антарктидой и выводятся в космос — как в ходе кратковременных экспедиций, так и в качестве постоянных приборов. В 2011 году для поиска частиц темной материи, на Международной космической станции был установлен бочкообразный альфа-спектрометр AMS-02, весом в 7.5 тонн и стоимостью два миллиарда долларов, что примерно в три раза больше, чем цена гравитационного детектора LIGO. Увы, в отличие от LIGO, постройка которого привела к грандиозному успеху (см. раздел 9.2), поиск частиц темной материи на AMS-02 оказался безрезультатным. Главная причина этого очевидна: если эксперимент LIGO был основан на теоретических расчетах и предсказаниях хорошо проверенной теории Эйнштейна, то все эксперименты по поиску элементарных частиц темной материи опирались лишь на многочисленные, но очень шаткие гипотезы.

Ученые проводили эксперименты по поиску темных частиц и на Большом Адронном Коллайдере (БАК) в Европе, бурно реагируя на любые признаки отклонения от Стандартной теории. В декабре 2015 года группа ученых, работавшая на БАК, сообщила о признаке существования новой частицы, которая не укладывалась в Стандартную теорию элементарных частиц. Результат имел невысокую статистическую достоверность, и в августе 2016 года эта же группа сделала вывод, что никакой новой частицы нет — приборы просто показали статистическую флуктуацию. Но для объяснения существования этой несуществующей частицы теоретиками за восемь месяцев было опубликовано 600 научных статей, включая публикации в самых престижных физических журналах. Был ряд подобных «темных» фальстартов на других инструментах, но все они закончились разочарованием.

В 2017 году я участвовал в конференции о «темной Вселенной» на французском острове Гваделупа. Сообщество сторонников темных частиц, собравшихся на конференции, впечатляло. Участники конференции были практически поголовно искателями частиц темной материи (вимпов, аксионов и других частиц). Они их искали везде - в подземных лабораториях, в космосе и на ускорителях. Мировую карту с десятком лабораторий гордо показывал каждый второй

докладчик. Они искали эти темные частицы уже тридцать лет с нулевым успехом, но с большим бюджетом. От безрыбья они хватались за любую соломинку, например, загадочные годовые вариации в показаниях каких-то европейских приборов, были объявлены возможными вариациями потока частиц темной материи из центра галактики, хотя ежу понятно, что годовые вариации атмосферы тоже вызывают вариации локального мюонного потока – да мало ли сезонных факторов можно найти, которые могут повлиять на показания сверхчувствительных приборов. Отмечу, что попытки найти эти годовые вариации на аналогичных приборах, специально построенных для этой цели в других странах, оказались безуспешными. Эти неудачи вызвали скандальные сомнения в корректности методики оригинальных наблюдений, которая не отличается прозрачностью из-за каких-то секретных патентованных технологий.

На дискуссии в Гваделупе раздался робкий юный голос: что же нам делать, если уже все возможности для обнаружения WIMP исчерпаны? На что бодрые голоса постарше ответили, что далеко не все возможности испробованы, просто нужны новые эксперименты с лучшей чувствительностью. Детектор с тремя тоннами ксенона ничего не дает? Тогда нужно построить детектор в триста тонн! Будущие перспективы были усыпаны эпитетами: «exciting, fascinating, amazing» («волнующие, захватывающие, удивительные»). Было очевидно, что решение проблемы темной материи вне квантовой парадигмы (или вне концепции «темных» элементарных частиц) будет катастрофой для этих людей. Один докладчик начал свое выступление с категоричного заявления: «Я не собираюсь обсуждать, почему мы верим в темную материю из элементарных частиц». Действительно, альтернативы ВИМПам практически не рассматривались. Очевидно, что никакие научные доводы не изменят предубеждений фанатичных искателей темных частиц, которые даже не собираются рассматривать альтернативные варианты. Это сообщество будет существовать, пока есть питающий его денежный поток.

8.2 Обоснование квантовой космологии: отсутствует

Физики обсуждают разные типы гипотетических легких полей, энергия которых могла бы выступать в качестве темной энергии. В наиболее простом с теоретической точки зрения варианте плотность энергии нового поля убывает со временем. Для поля такого типа употребляют термин «квинтэссенция». Не исключена, однако, и обратная возможность, когда плотность энергии растет со временем; поле такого типа называют «фантомом».
Академик В. Рубаков

Неизвестные эффекты контролируют вакуумную энергию, неизвестные поля создают квинтэссенцию, неизвестные эффекты связывают квинтэссенцию с плотностью материи во Вселенной. Описание современной космологии по Кори Пауэлл

За последние 40 лет ни одна из основных гипотез квантовой космологии не получила своего обоснования. Как следует из обсуждения в предыдущем параграфе, элементарные частицы, которые отвечали бы за темную материю, не были найдены, при этом области возможных (еще неисследованных) значений масс и сечений рассеяний для ВИМПов кардинально сузились. Природа «заданного руками» инфлатона, ответственного за Большой взрыв, осталась такой же загадочной, как и в момент его сотворения. Хотя мощное начальное ускорение Вселенной решало проблему ее однородности и изотропии, впоследствии выяснились очень неприятные особенности такого решения. Например, «проблема начальных значений»: для получения современной Вселенной, начальные условия в момент начала расширения должны быть заданы с точностью 10^{-79} . Если начальная плотность отклонится от нужного значения на величину 10^{-79} , то вселенная станет совершенно иной: или разлетится практически в бесконечность к

настоящему моменту, или (при отклонении в сторону чуть большей плотности) уже сколлапсирует. Стивен Хокинг пишет о проблеме начальных значений: «Если бы через секунду после большого взрыва скорость расширения оказалась бы на одну сотысяча-миллион-миллионную меньше, то произошло бы повторное сжатие Вселенной, и она никогда бы не достигла своего современного состояния» (С. Хокинг «От большого взрыва до черных дыр», 1990).

Эта неприятность заставила инфляционистов генерировать огромное количество вселенных (фигурируют числа в 10^{500} миров и даже гораздо больше) – для получения хотя бы некоторых Вселенных с приемлемыми условиями для жизни. Это использование антропного принципа в космологии выглядит очень неубедительно, как убедительно показано в работе М. Frankel “Fine Tuning”, January 2022 (Foundational Questions Institute). Автор известного астрономического учебника Петер Шнайдер выразился иронично: антропный принцип можно рассматривать как «объяснение», но можно и как «капитуляцию».

Н. Турок и П. Стейнхардт пишут об инфляционной теории: «Инфляция была лидирующим сценарием ранней вселенной в течение двух десятилетий и стала привычным элементом общепринятой космологической модели. Однако до сих пор теория не решила многих проблем. ...Великая космологическая головоломка, начальная сингулярность – начало времени и образование наблюдаемого мира – остается столь же загадочной, как и всегда».

Гипотезе об отрицательном вакуумном давлении, которое должно объяснить наблюдаемую величину космологическую постоянную и современное ускорение расширения Вселенной, уже больше 20-ти лет. Но не появилось никаких прорывных результатов, которые бы обосновали это антидавление вакуума. Надежды на теоретическое получение космологической постоянной из квантовых флуктуаций вакуума не оправдались: квантовая теория поля приводит, или к нулевому значению космологической постоянной, или к значению, которое на 120 порядков превосходит наблюдаемое значение. Это известно как «самое плохое теоретическое предсказание в истории физики».

Трудной является и «проблема совпадения» (иногда ее называют «проблемой Нэнси Кэрриган», по имени литературной героини, которую волновали схожие вопросы, хотя и не в области космологии). Согласно квантовой космологии, такие сущности, как темная энергия и темная материя являются физически не связанными феноменами, которые определяются совершенно разными полями и сортами частиц. И тогда возникает вопрос – почему они по порядку величины совпадают?

Отсутствие теоретического обоснования мало смущает квантовых космологов: они часто утверждают, что их модели прекрасно согласуются с наблюдениями. Это, безусловно, миф. В настоящее время все космологические наблюдения хорошо описываются Стандартной космологической моделью, которая предполагает плоскую Вселенную с шестью свободными параметрами (например, барионная плотность, плотность темной материи и величина космологической постоянной), которые подбираются так, чтобы модель совпадала с наблюдениями. Эта модель основана на классических уравнениях Фридмана, и параметры этой модели носят феноменологический характер. Стандартную модель часто называют Λ CDM (Lambda-Cold Dark Matter) моделью. Она включает в себя плотность темной материи и величину космологической постоянной, но не делает никаких предположений о природе этих феноменов. Предположение о квантовой природе Вселенной не играет существенной роли в Λ CDM модели – к ней могут приводить космологические теории разных типов.

Инфляционисты часто приводят наблюдаемый спектр флуктуаций реликтового излучения (см. рис. 2 и цветную иллюстрацию 7) в качестве своих достижений и подтверждения своих моделей. Но, как пишут в 2016 году в обзоре по космологиям отскока Р. Бранденбергер и П. Петер: «Успешные предсказания, сделанные инфляцией для спектра космологических возмущений, не являются специфическими для инфляции. Фактически, за десятилетие до развития инфляционной космологии Сюняевым и Зельдовичем [“Small-scale fluctuations of relic radiation”, *Astrophysics and Space Science*, 1970], а также Пиблзом и Ю [“Primeval adiabatic perturbation in an expanding universe”, *ApJ*, 1970] было осознано, что приблизительный масштабно-инвариантный спектр

адиабатических возмущений, которые присутствуют во времена равенства материи и излучения в супер-хаббловских масштабах, приведет к масштабно-инвариантной асимптотике Сакса-Вольфа на больших углах и к акустическим колебаниям на шкале нескольких градусов в угловом спектре мощности реликтового излучения; это приведет к масштабно-инвариантному спектру мощности первичных флуктуаций плотности и наложенным барионным акустическим колебаниям малой амплитуды: все эти особенности сейчас наблюдаются».

Максимально упрощенное высказывание Бранденбергера-Петера означает следующее: все пики и провалы в распределении неоднородностей реликтового излучения, показанные на рис.2, связаны с классической физикой акустических колебаний и т.д. Гипотезы квантовой инфляции влияют только на самые крупные флуктуации реликтового излучения (плато, отмеченное прямоугольником на верхнем графике рис.2).

Современная квантовая космология – это дом без единого кирпича в фундаменте. Этот дом парит в воздухе лишь одной силой убежденности. Ученые, получившие университетское образование в последние десятилетия, выросли в атмосфере веры (не побоимся этого слова), что инфлатон, ВИМПы и прочие квантовые космические чудеса – это реальные и доказанные вещи. Ведь в этой области работают тысячи ученых, а бюджеты квантово-космологических исследований исчисляются миллиардами! Могут ли все они ошибаться? Да! Примеров массовой ошибочной увлеченности в истории науки – масса (например, теория эфира). У инфляционной модели столько свободных параметров (или вариантов модели), что позволяет подгонять эту теорию под практически любой набор эмпирических данных.

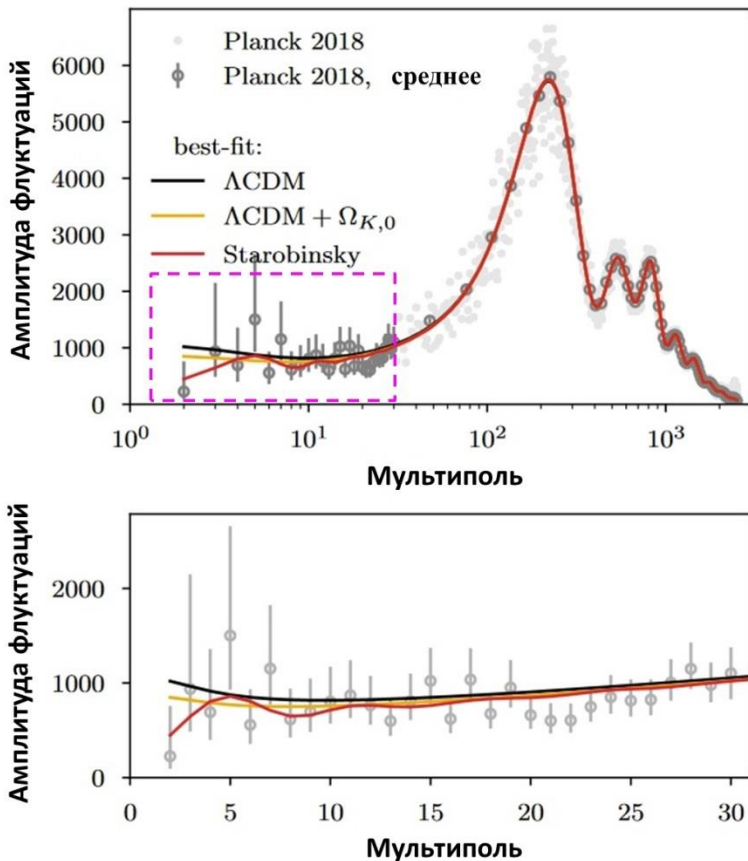


Рис.2 Сравнение теоретического и наблюдаемого (по данным спутника «Планк») спектров мощности флуктуаций реликтового излучения разных угловых масштабов (из статьи Hergt et al., 2022). Угловой размер флуктуаций равен 360° /номер мультиполя. Самая левая точка соответствует 180° , а самый высокий пик – мелкомасштабным флуктуациям примерно в 1° . Все пики и провалы между ними объясняются в рамках классической физики, различные варианты квантовой инфляционной теории влияют только на плоскую левую часть верхнего графика, взятую в прямоугольник (см. нижний график). Вариант замкнутой Вселенной отмечен добавлением величины $\Omega_{K,0}$.

Сабина Хоссенфельдер пишет: «Теоретики вводят одно или несколько новых полей и потенциалов, которые управляют

динамикой Вселенной... Существующие наблюдательные данные не позволяют сделать выбор между моделями. И если даже обнаруживаются новые данные, все еще остается бесконечно много моделей, о которых можно писать статьи. По моим оценкам, сейчас в литературе описано несколько сот таких моделей. Для каждого выбора инфляционных полей и потенциалов можно вычислять наблюдаемые величины и затем двигаться к следующим полям и потенциалам. Вероятность того, что любая из этих моделей описывает реальность, бесконечно мала — это рулетка на бесконечно большом столе. Но согласно существующим критериям качества, это первоклассная наука. Такой же поведенческий синдром возник в астрофизике, где теоретики придумывают поля для объяснения космологической постоянной ... и предлагают все более сложные "невидимые сорта" частиц, которые — может да, а может нет — составляют темную материю».

Главная проблема инфляционной космологии в том, что под ней нет базисной теории. Теория струн, которую рассматривают как самую перспективную для создания «теории всего», включая квантовую теорию гравитации, вводит сразу несколько новых пространственных размерностей (доводя общее число измерений пространства до 10 или 26). Это позволяет по-новому интерпретировать многие наблюдаемые реалии, включая элементарные частицы. Струнная теория рассматривается многими как наиболее перспективный подход и к космологии. Тем не менее, теория струн, над которой уже пятьдесят лет работают сотни теоретиков, еще далека от объяснения существующих элементарных частиц, построения квантовой гравитации, а также решения проблем сингулярности или Большого взрыва. Напомним, что Эйнштейн построил ОТО за пять лет практически в одиночку. Кип Торн в книге «Будущее Пространства-времени» (2002) делает следующие предсказания о теории струн: «К 2020 году физики будут понимать законы квантовой гравитации, которые будут найдены как вариант теории струн. К 2040 году мы, используя эти законы, получим достоверные ответы на многие глубокие и интригующие вопросы, включая:

- Какова истинная природа сингулярности Большого взрыва, в которой родились пространство, время и вселенная?

- Что было до сингулярности Большого взрыва или здесь даже не было такой вещи как «до»?

...

- Какова истинная природа сингулярностей внутри черных дыр?»

Увы, к 2022 году, спустя 20 лет после предсказаний Торна, теория струн также далека от построения квантовой теории гравитации, как и в 2002 году, что ставит под сомнение и другие прогнозы о ней. Р. Пенроуз ввел следующую градацию гравитационно-космологических теорий («Новый ум короля», 2003):

- превосходные теории (единственный пример Пенроуза: теория гравитации Эйнштейна);
- полезные теории (единственный пример Пенроуза: теория Большого взрыва);
- пробные (неверные).

Примеров неверных теорий Пенроуз не привел, отметив, что не хочет терять друзей. Но очевидно, что к третьей категории относятся все гравитационно-космологические теории и модели, кроме ОТО и концепции Большого взрыва.

В квантовой космологии и теории струн сложилась необычная ситуация. Эти теории вытеснили всех конкурентов и обеспечили себе практически монопольное положение. Так как эти теории весьма слабо связаны с наблюдениями (как теория струн) или имеют множество параметров или версий (как теория инфляции), которые позволяют подогнать теорию под любые наблюдения (если надо – то и задним числом), то трудно надеяться на то, что эти теории рухнут под напором новых фактов. Они держатся на самоуверенности и многочисленности тех, кто работает в этих областях.

В западном бизнесе и рекламе часто применяются принципы, которые отражены в афоризмах: "Fake it until you make it" («Притворяйся, пока не сделаешь») или "Act as if you already have it" («Действуй так, как будто оно у тебя уже есть»). Судя по всему, эти принципы глубоко проникли и в некоторые области современной науки.

Питер Войт, математик из Колумбийского университета (Нью-Йорк), бескомпромиссно критикует теорию струн, написав книгу "Not even wrong" («Даже не неправильно»). Он приводит

мнение некоторых профессионалов, которые знают ситуацию в фундаментальной физике «изнутри».

Шэлдон Глэшоу, нобелевский лауреат 1979 года, один из создателей единой теории поля и Стандартной теории элементарных частиц, в 1988 году сказал о теории струн (цитируется по книге П. Войта): «Но физики-суперструнщики еще не доказали, что их теория действительно работает. Они не могут продемонстрировать, что Стандартная теория является логическим результатом теории струн. Они даже не могут быть уверены, что их формализм включает описание таких вещей, как протоны и электроны. И они еще не сделали ни одного крошечного экспериментального предсказания». Далее Глэшоу задает «неудобные» вопросы:

«Если люди не могут интерпретировать наблюдаемые свойства реального мира, то они просто не занимаются физикой. Следует ли университетам платить им и разрешать развращать впечатлительных студентов? Смогут ли молодые доктора философии, чьи знания ограничены теорией суперструн, найти работу, если и когда струна лопнет? Может струнные идеи больше подходят для факультетов математики или даже для богословских школ, чем для факультетов физики?»

За последующие десятилетия, которые последовали за этими жесткими заявлениями Глэшоу, теория струн так не смогла получить ни одного экспериментального подтверждения или вывести из своих уравнений Стандартную теорию элементарных частиц как предельный случай. Но струнные теоретики не только не были изгнаны из кафедр физики к абстрактным математикам, а, наоборот – разрослись так, что практически вытеснили всех остальных физиков-теоретиков из университетов.

Питер Войт насчитал в 2006 году в США примерно тысячу струнных теоретиков, которые захватили все командные высоты в ведущих университетах – и определяли политику распределения должностей и грантов. Близкая ситуация сложилась и в области космологии, где тон стали задавать квантовые инфляционисты, активно пропагандирующие теорию множества Вселенных. Мы имеем дело с феноменами научного «расцвета», которые не связаны ни с экспериментальными прорывами, ни с теоретическими успехами, а с монопольным

положением самой популярной теории и доминированием ее сторонников.

Альберт Эйнштейн закончил университет в 1900 году, в возрасте 21 года, но не смог найти работу в науке из-за его независимости и нестандартного мышления. Два года, до июля 1902, Эйнштейн был безработным и буквально голодал. Друзья устроили его сотрудником Бюро патентов, где он и проработал более семи лет – до октября 1909 года. За это время он написал более 10 научных статей, включая ключевые работы по специальной теории относительности и квантовой теории фотоэффекта (за которую он получит позже Нобелевскую премию), а также диссертацию, став в 1906 году доктором наук (PhD). Только в конце 1909 года Эйнштейн, в возрасте 30 лет, попал в научно-академическую среду, и стал зарабатывать преподаванием физики в университете, а не анализом технических патентов.

С тех пор ситуация в фундаментальной физике еще больше ухудшилась: независимость молодых исследователей от общепринятой научной парадигмы стала практически невозможна. Видный ученый Ли Смолин предупреждает современных молодых ученых: «Идти по пути Эйнштейна — значит рисковать заплатить цену, которую он заплатил: безработица, несмотря на могучий талант и навыки в области теоретической физики». В своей книге 2006 года Смолин, который тоже знает ситуацию «изнутри», пишет: «Для меня поразительно то количество различных ученых, кто кажется не в состоянии принять возможность того, что как теория струн, так и гипотеза хаотической мультивселенной являются ложными». «Первая вещь, которую замечает сторонний наблюдатель по поводу сообщества теории струн, это потрясающая самоуверенность. Как свидетель первой суперструнной революции в 1984, я вспоминаю ощущение триумфа, с которым приветствовали новую теорию. Дэн Фридэн, одна из молодых звезд этой области, сообщил мне: «Все совершится в течение следующих двенадцати или восемнадцати месяцев. Вам лучше войти в тему, пока в теоретической физике останутся хоть какие-то задачи». Это было лишь одно из многих утверждений, что все места скоро будут заняты. Конечно, этого не произошло. Но через все последующие взлеты и падения многие струнные

теоретики продолжали быть в высшей степени уверенными, как в истинности теории струн, так и в их превосходстве над теми, кто не может или не хочет ею заниматься. Для многих струнных теоретиков, особенно для молодых, не помнящих физику, которая была до них, является непостижимым, что талантливые физики, получив шанс, могут выбрать что-нибудь другое вместо того, чтобы быть струнным теоретиком. Эта позиция, конечно, вызывает отвращение физиков в других областях. Вот мысли из блога физика Джоэнн Хьюитт, занимающейся частицами в Стэнфордском Линейном Ускорительном Центре: «Я нахожу высокомерие некоторых струнных теоретиков поразительным, даже по стандартам физиков. Некоторые искренне уверены, что все не струнные теоретики являются учеными второго сорта. Это повсюду в их рекомендательных письмах друг другу, и некоторые из них на самом деле говорили это мне в лицо».

Смолин откровенно отмечает: «Доминирующая группа таких самоуверенных теоретиков, не стесняясь, отбирает деньги и работу у представителей альтернативных теорий, пользуясь своей многочисленностью». Джоэнн пишет о нравах в среде струнных теоретиков: «Теория струн считается настолько важной, что ее следует развивать за счет всех других теорий. Есть два проявления этого: теоретики струн нанимаются на должности преподавателей на непропорционально высоком уровне, который не обязательно соизмерим со способностями, и более молодой теоретик струн обычно плохо образован в физике элементарных частиц. Некоторым буквально сложно назвать элементарные частицы, существующие в природе».

Смолин приводит следующую историю: «Высокомерие, которое описала доктор Хьюитт, стало свойством сообщества струнных теоретиков с самого начала. Субрахманьян Чандрасекар, возможно, величайший астрофизик двадцатого столетия, любил рассказывать историю визита в середине 1980-х в Принстон, где он чувствовался за недавнее награждение Нобелевской премией. За завтраком он оказался рядом с важным молодым человеком. Поскольку физики часто идут на неформальное общение, он спросил своего напарника по завтраку: «Над чем вы работаете в эти дни?» Ответ был: «Я работаю над теорией струн, которая является самым важным достижением в физике двадцатого столетия». Молодой человек

продолжил советовать Чандре прекратить то, что он делал, и переключиться на теорию струн, или он рискует стать столь же ненужным, как те, кто в 1920-е немедленно не принял квантовую теорию. "Молодой человек, – ответил Чандра, – Я знал Вернера Гейзенберга. Я гарантирую вам, что Гейзенберг никогда не был столь груб, чтобы сказать кому-нибудь, чтобы тот оставил то, что делает, и занялся квантовой теорией. И он определенно никогда не был столь неучтив, чтобы сказать кому-нибудь, кто получил своего доктора философии пятьдесят лет назад, что он близок к тому, чтобы стать ненужным». Любой, кто имеет дело со струнными теоретиками, регулярно сталкивается с этим видом крайней самонадеянности. Не имеет значения, какая проблема обсуждается, единственный вариант, который никогда не возникает (кроме случаев, когда он вводится сторонним наблюдателем), это что теория может просто быть неправильной».

Питер Войт в своей книге «Даже не неправильно» приводит невероятную (или наоборот – вполне вероятную?) историю о двух братьях-близнецах из Франции, которые получили математическое образование, а потом стали шоуменами и телеведущими научно-популярных передач. В возрасте около пятидесяти лет они решили обзавестись научными степенями и опубликовали в ведущих журналах несколько статей по квантовой космологии на основе теории струн, после чего каждый из них получил докторскую степень. Темы их диссертаций были весьма «высоконаучны»: «Квантовые флуктуации метрической сигнатуры по шкале Планка» и «Топологическое состояние пространства-времени в нулевом масштабе».

Через некоторое время разразился скандал: несколько физиков выступили с заявлениями, что эти статьи и диссертации – мистификация, они представляют собой бессмысленный набор утверждений. Но лишь спустя несколько лет Национальный центр научных исследований Франции признал, что работы братьев не представляют научной ценности (что, впрочем, не помешало братьям продолжать писать популярные книги о космологии). Впечатляют затруднения, с которыми столкнулись физики, в попытке доказать мистификацию этих аферистов. Вот что пишет очевидец из Гарварда (цитируется по книге Войта),

где после шума в Интернете стали обсуждать работы и диссертации близнецов из Франции: «Никто из группы физиков-струнщиков в Гарварде не может сказать, настоящие эти статьи или поддельные. Сегодня утром сказали, что это мошенничество - и все смеялись над тем, насколько это очевидно. После обеда сказали, что они настоящие профессора и что это не мошенничество, и все заговорили: ну, может быть, это настоящая наука».

Суть этих затруднений понятна – потому что остальные работы по квантовой космологии, в которых масса математики и фантастики, но практически нет физики и наблюдений, трудноотличимы от «трудов» французских близнецов.

Несомненно, легко найти множество противоположных утверждений видных авторитетов, которые объявляют теорию струн и инфляционное размножение Вселенных высочайшими достижениями человеческого разума. Но обсуждение достоверности теории струн, квантовой гравитации или концепции «мультиверса» выходят за рамки данной книги. Заинтересовавшиеся читатели могут обратиться к книгам Ли Смолина, Питера Войта, Сабины Хоссенфельдер и к материалам знаменитой дискуссии 2017 года, вызванной статьей Иджас, Стейнхардта и Лоеба в «Сайентифик Американ». Со своей стороны, отметим лишь, что, согласно базисным принципам научных исследований, теоретики, чьи модели еще не подтверждены на практике, должны вести себя скромно и осторожно, как бы они не были довольны друг другом и какие бы блестящие перспективы впереди них, с их точки зрения, не сияли. Сияние чистого разума всегда должно подкрепляться приземленными и прочными фактами. Нарушение этого базисного правила науки грозит растраченными зря силами и личными катастрофами.

Вышесказанное позволяет трезво отнестись к реалистичности квантовой космологии. Наступило время новой космологической революции, которая на наших глазах создает убедительную модель Вселенной на основе доказанных фундаментальных теорий, в первую очередь – на основе общей теории относительности. Более того, динамика современной Вселенной управляется слабыми гравитационными полями, для которых эйнштейновские тензорные уравнения переходят в

скалярные уравнения Ньютона. Следовательно, основная пружина динамической модели Вселенной может быть описана не только в рамках теории Эйнштейна, но и на языке ньютоновского гравитационного потенциала. Признаки правильности новой космологической модели должны быть очевидны:

- она будет базироваться на доказанных теориях, и не будет вводить ни одного нового поля, или фундаментальной константы, или квантовой субстанции, или сорта частиц, или нового измерения;

- она должна объяснить все основные факты наблюдательной космологии;

- она сделает конкретные предсказания, которые можно будет проверить наблюдениями.

Просто ведь, правда?

Часть III. Новая модель пульсирующей Вселенной

Какой-то принцип, единственно верный и единственно простой, когда он нам станет известен, будет также столь очевидным, что не останется сомнений: Вселенная устроена таким-то и таким-то образом и должна быть так устроена, а иначе и быть не может. Но как открыть этот принцип?

Ч. Мизнер, К. Торн и Дж. Уилер, «Гравитация» (1977)

Глава 9. Выход из кризиса или свет в конце космологического туннеля

Несомненно, дверь однажды распахнется, и перед нами откроется сверкающий механизм движения мира во всем великолепии и простоте.

Ч. Мизнер, К. Торн и Дж. Уилер, «Гравитация» (1977)

Если проблемы сингулярности и природы Большого взрыва не решаются в течение многих десятилетий, невзирая на все усилия талантливейших физиков, то это не означает, что последние недостаточно умны. Это может означать, что изначально было пропущено что-то важное в подходе к решению этих проблем. Отсутствие этого ключевого пункта и делает безуспешными все попытки решения, возможно, достаточно простого.

Но где тот поворотный пункт, пропустив который, мы потеряли возможность решения этих проблем в рамках теории Эйнштейна? Был ли здесь один пропущенный ключ или несколько? Был ли он найден и потерян, или еще никто не дотрагивался до того звена, потянув за которое, можно вытащить всю цепь? Если эта идея была ранее высказана и не оценена по

достоинству, то история физики может оказать хорошую услугу самой физике.

Попробуем проанализировать общую теорию относительности и понять: что вызывает ее (или нашу) неспособность решить основные проблемы динамики Вселенной. Физические уравнения диктуются природой, но их интерпретация, а также трактовка полученных решений часто беззащитны перед человеческим стремлением к упрощению (или усложнению).

9.1 Столетние споры о реальности энергии гравитационного поля

...новая научная истина прокладывает дорогу к триумфу не посредством убеждения оппонентов и принуждения их видеть мир в новом свете, но скорее потому, что ее оппоненты рано или поздно умирают и вырастает новое поколение, которое привыкло к ней.
Макс Планк

Электрические заряды порождают электромагнитное поле. В общем виде плотность энергия-импульс электромагнитного поля описывается тензором второго ранга. Квантовая электродинамика интерпретирует электромагнитное поле как набор квантов или фотонов, которые существуют в каждой точке пространства вокруг заряда (количество таких фотонов в любой локальной области пространства можно буквально пересчитать).

Знаменитый закон гравитации Ньютона является решением уравнения Пуассона, которое связывает гравитационный потенциал φ с его источником - гравитационной массой с плотностью ρ : $\Delta\varphi = 4\pi G\rho$, где значок Δ означает дифференциальный оператор Лапласа $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$. Отметим, что в уравнении Пуассона сам потенциал никоим образом не входит в источники поля (то есть не является источником самого

себя). Уравнения Эйнштейна – это релятивистское тензорное обобщение уравнения Пуассона. В левой части эйнштейновских уравнений появляются вторые производные от аналога потенциала – метрического тензора второго ранга, описывающего искривление четырехмерного пространства-времени, а справа фигурирует уже не скалярная плотность материи, а тензор второго ранга для энергии-импульса, например, вещества и электромагнитного поля (см. Приложение II). После формулировки уравнений ОТО возник вопрос – нужно ли включать энергию самого гравитационного поля в число источников гравитационного поля? Ньютон ответил бы, что нет.

Но если исходить из принципа равноправия энергий, то надо включать. А для этого требуется получить тензор энергии-импульса гравитационного поля – такой же, какой получен для энергии-импульса электромагнитного поля. Но математический объект второго ранга, который Эйнштейн предложил для описания энергии и импульса гравитационного поля, оказался не тензором: Эрвин Шредингер в 1918 году показал, что такой объект можно превратить в ноль даже простым выбором системы координат. Поэтому величину, описывающую энергию-импульс гравитационного поля, стали называть «псевдотензором». Постепенно выяснилось, что вывести тензор энергии-импульса гравитационного поля в принципе невозможно!

Причина не в неумении физиков, а в самой ОТО, в основе которой лежит фундаментальный принцип эквивалентности, который устанавливает равенство между гравитационным полем и искривленным пространством. Этот принцип можно сформулировать как утверждение, что наблюдатель, запертый в небольшом лифте и свободно падающий в искривленном пространстве (=гравитационном поле), никаким способом не сможет отличить свое пространство от плоского, а свое падение – от покоя. Для него гравитационное поле полностью исчезает, как и энергия этого поля. Такое локальное обнуление энергии гравитационного поля для свободно движущегося наблюдателя называется нелокализуемостью гравитационной энергии. Этот феномен противоречит тензорному описанию энергии. Именно принцип эквивалентности является фундаментальным препятствием для квантования гравитационного поля, потому что, введя гравитоны или кванты такого поля, мы сталкиваемся с

той проблемой, что их число магическим образом обнуляется для падающего наблюдателя.

Проблему энергии импульса в ОТО хорошо описал В.И. Родичев в своей книге: «Трудности, связанные с нетензорным характером величин, описывающих энергию, импульс и момент гравитационного поля, оказались настолько серьезными и неприступными, что их постепенно начали рассматривать как проявление особых свойств гравитационного поля – универсальности, неэкранируемости, нелокализуемости и т.д.» Сам же Родичев считает, что понятие «нелокализуемость» гравитационного поля отражает «скорее наше бессилие в данном вопросе, чем существо дела». Ученый резонно пишет: «...встает вопрос – в чем причина появления нековариантных результатов в теории, одним из принципов которой является принцип общей ковариантности». («Теория тяготения в ортогональном репере», 1974).

Нетензорность и нелокализуемость гравитационной энергии предельно осложнила вопрос о включении этой энергии в список источников гравполя. Возникла и уже сто лет не прекращается дискуссия - реальна ли гравитационная энергия? Н.В. Мицкевич, автор известного учебника по ОТО, рассматривает приливное воздействие Луны через космическое пространство на Землю, которое сопровождается передачей энергии спутника приливным горбам,двигающимся по поверхности нашей планеты. Он делает вывод: «Так как в этом промежуточном пространстве нет ничего, кроме гравитационного поля, то на этом промежуточном этапе передачи энергии она должна принадлежать только этому последнему. Отсюда с необходимостью следует факт существования гравитационной энергии». («Физические поля в общей теории относительности», Наука, М, 1969). Но здесь есть логическая ошибка: переносить энергию - не значит обладать ею. Любой банковский курьер, который перевозит деньги, это подтвердит.

А.С. Эддингтон пишет об энергии гравитационного поля: «Величина t_{μ}^{ν} представляет собой потенциальную энергию классической механики, мы же вообще не считаем ее каким-либо видом энергии. Она не является тензорной плотностью, и ее можно сделать равной нулю в любой точке, произведя

соответствующее преобразование координат. Мы не рассматриваем t_{μ}^{ν} как некоторое абсолютное свойство, характеризующее структуру мира». Мнение Эддингтона, создавшего знаменитую книгу по ОТО (см. Приложение I), можно сформулировать так: есть две живые силы (“vis viva”) или величины, которые управляют динамикой Вселенной: энергия-импульс материи и искривленное пространство-время. Связь этих величин описывается тензорным уравнением Эйнштейна. Сложить эти две величины в один закон энергии можно лишь приближенно (то есть, «нетензорно»), потому что каждая из них описывается своим тензорным законом изменения.

Например, в экономике в качестве валют могут выступать бумажные деньги и золотые монеты. Каждый вид валюты сохраняется по отдельности (описывается тензорным законом), но если мы попробуем написать суммарный закон сохранения валюты, то нам придется все время сверяться с биржевым курсом стоимости золота по отношению к бумажным деньгам – то есть, суммарное богатство окажется нетензорной, плавающей величиной.

В физике все дополнительно усложняется отсутствием точного закона сохранения каждой из компонент «живой силы» Вселенной и возможностью их взаимного перехода: так масса вещества может переходить в гравитационные волны, а те могут, взаимодействуя с детектором, снова увеличивать энергию и импульс вещества.

Может ли нетензорная и нелокализуемая гравитационная энергия служить источником тензорного гравитационного поля? В научном сообществе сложилось две противоположных точки зрения об учете энергии-импульса гравполя как источника дополнительного искривления пространства:

1. Гравитационная энергия нелокальна и нетензорна, но все равно реальна и должна быть рассмотрена как источник гравполя. Нобелевский лауреат Р. Пенроуз пишет: «Энергия, а, следовательно, и масса гравитационного поля ведут себя подобно скользкому угрею, так что их невозможно «привязать» в какому-нибудь четко определенному месту. Тем не менее, к гравитационной энергии следует относиться со всей серьезностью. Она заведомо присутствует, и ее

необходимо учитывать для того, чтобы сохранить смысл понятия массы» («Новый ум короля», 2003).

2. Гравитационное поле – это искривленное пространство, оно может воздействовать на объекты, не обладая классически определяемой энергией. Гравитационная энергия – фикция, исторически сложившееся понятие. В источники ее вставлять нельзя. Нобелевский лауреат Жерар 'т Хоофт подчеркивает, что «любая модификация уравнений Эйнштейна» в которой гравитационное поле является источником дополнительного поля и вносит вклад «в тензор напряжения-энергии-импульса, вопиюще ошибочно. Написание такого варианта выдает полное непонимание общей теории относительности. Энергия и импульс гравитационного поля полностью учитываются нелинейными частями исходного уравнения».

Каждую позицию поддерживает множество ученых, хотя возможно, что за первую, более психологически приемлемую, выступает большинство. Какой точки зрения придерживался сам Эйнштейн? До 1916 года он выступал за первую трактовку, а позже стал сторонником второй точки зрения. После изучения двух сотен статей и писем Эйнштейна, можно составить следующую примечательную таблицу I его утверждений о гравитационной энергии и об источниках гравитационного поля.

Как следует из таблицы, в 1913-1916 годах Эйнштейн включает в свои уравнения в качестве источника гравитационного поля не только энергию-импульс обычного вещества и электромагнитного поля, но и энергию-импульс самого гравитационного поля, и многократно подчеркивает это обстоятельство. Это означает, в частности, что облако из гравитационных волн должно искривлять пространство вокруг себя, действуя на него как обычное материальное тело. В 1913-1916 годах опубликовано 25 утверждений Эйнштейна (словесных и математических) о том, что гравитационная энергия искривляет пространство аналогично энергии обычной материи, например: «энергия гравитационного поля должна действовать в смысле тяготения точно так же, как всякая энергия другого рода» (1916). Зато в 1917-1955 годах Эйнштейн стал

придерживаться противоположного взгляда – и этому есть 16 свидетельств.

Таблица I. Эволюция мнения Эйнштейна о гравитационной энергии

Годы	Сколько раз приведены уравнения для гравитационного поля	Число утверждений Эйнштейна:	
		Гравитационная энергия входит в число источников поля вместе с энергией материи	Источником гравполя является только материя (или гравэнергия не является источником поля)
1913	3	7	-
1914	5	10	-
1915	2	3	-
1916	3	5	-
1917	1	-	1
1918	1	-	3
1919	1	-	1
1920-1929	6	-	5
1930-1939	8	-	4
1940-1949	3	-	1
1950-1955	1	-	1

Мы будем называть общую теорию относительности в первоначальной трактовке теорией 1915 года, а более позднюю версию эйнштейновской теории гравитации – как ОТО 1919 года, потому что Эйнштейн сформулировал ее предельно четко к этому времени и оставался на позициях такой интерпретации ОТО до конца жизни. Например, Эйнштейн в 1953 году пишет о главном уравнении ОТО: «Правая часть уравнения (1) феноменологически описывает все источники гравитационного поля. Тензор T_{ik} представляет энергию, которая создает гравитационное поле, но сама не имеет гравитационного характера, как, например, энергия электромагнитного поля, энергия, связанная с плотностью вещества и т.д.». Тем не менее, Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц утверждают в своем учебнике: «Обладая определенной энергией, гравитационная волна сама

является источником некоторого дополнительного гравитационного поля» («Теория поля», 1973). В учебнике «Гравитация» Ч. Мизнера, К. Торна и Дж. Уилера, вышедшем в том же 1973 году, написано следующее: «...«локальная гравитационная энергия-импульс» не весит, не искривляет пространство, не служит источником, стоящим в правой части уравнений поля Эйнштейна, не вызывает никакого относительного геодезического отклонения двух соседних мировых линий, проходящих через рассматриваемую область, и не наблюдаема».

Кто прав? Мнение автора теории должно иметь наивысший приоритет. Почему же многие не прислушались к мнению Эйнштейна? С одной стороны, как это не удивительно, но современные физики часто уверены, что они лучше понимают ОТО, чем сам Эйнштейн (причины этой уверенности не очень понятны, возможно тут действует какой-то психологический компенсаторный механизм). Например, М. Турнер, профессор Чикагского университета, в журнале *Discover* 2004 года утверждал: «...мой покойный коллега и лауреат Нобелевской премии Субраманьян Чандрасекар часто говорил, что понимание Эйнштейном общей теории относительности весьма ограничено».

С другой стороны, мнение Эйнштейна по этому поводу попросту малоизвестно из-за труднодоступности его работ. Известный астрофизик (в будущем нобелевский лауреат) В.Л. Гинзбург писал еще в 1968 году: «...нельзя не удивляться тому, что за 13 лет, прошедших после кончины Эйнштейна, собрание его трудов не издано ни на его родном немецком языке, ни на английском языке...» («Эйнштейновский сборник» 1969-1970). Отметим, что и в 2022 году достаточно полное собрание научных сочинений Эйнштейна по-прежнему существует только на русском и японском языках. На полках книжных магазинов можно найти множество книг об Эйнштейне на английском и других языках: Эйнштейн и Пикассо, Эйнштейн и Будда, Эйнштейн в любви, Эйнштейн для идиотов, Эйнштейн и религия, Эйнштейн и музыка, Эйнштейн и что-то-там-еще, к чему прикоснулся (или не прикасался вовсе) когда-то этот великий ученый. По данным журналиста Фреда Джерома, около 200 книг об Эйнштейне написали его коллеги, ученики,

биографы, историки, родственники, друзья родственников и даже человек, который зачем-то и куда-то вез на автомобиле заспиртованный мозг Эйнштейна. Но нигде нельзя найти хотя бы избранного собрания сочинений этого великого ученого на английском языке – языке мировой науки. Настоящий позор для этой науки!

Первый том полного 25-томного (по последним оценкам) собрания сочинений Эйнштейна на английском увидел свет в издательстве Принстонского университета лишь в 1987 году, спустя 70 лет после создания общей теории относительности и через 32 года после смерти ученого. К 2022 году – за 35 лет (!) – было выпущено 16 томов, охвативших публикации ученого лишь до мая 1929 года. Судя по темпам издания, 25-ый том можно ожидать лишь к середине 21 века. Это рекордный по медлительности проект, когда переиздание сочинений занимает времени больше (ориентировочно - свыше 60 лет!), чем сам Эйнштейн потратил на их написание. Отметим, что 200-300 наиболее существенных научных работ и заметок Эйнштейна, легко бы уместились в 3-4 тома (например, труды Эйнштейна на русском вышли в 4-х томах). После завершения 25-томного принстоновского собрания сочинений, эти 3-4 сотни наиболее важных работ, придется буквально выуживать среди 43000 документов, планируемых для публикации. Остается только пожалеть Эйнштейна, который видел смысл своей жизни в науке, и чьи научные труды были практически изолированы от англоязычных ученых на многие десятилетия. Неудивительно, что современные западные гравитационисты плохо знакомы с оригинальными статьями Эйнштейна и с его мнением по вопросу гравитационной энергии.

Более 100 лет лучшие физики мира решали проблему улучшения описания «гравитационной энергии» и не продвинулись ни на шаг. Это признак того, что задача мнимая и нерешаема в обычном смысле, то есть, она является не физической, а психологической и должна рассматриваться в другой парадигме. Спор вокруг гравитационной энергии носил до последнего времени академический характер - ведь вклад энергии гравитационных волн обычно считался пренебрежимо малым. Но все изменилось в 2015 году, после открытий, сделанных обсерваторией LIGO.

9.2 Революция 2015 года: открытие гравитационных волн

Мы можем мыслить наше пространство, как имеющее повсюду приблизительно однородную кривизну, но легкие изменения кривизны могут существовать при переходе от одной точки к другой, в свою очередь, изменяясь во времени.

Уильям Клиффорд, «Здравый смысл точных наук» (1885)

Это свойство искривленности или деформации непрерывно переходит с одного участка пространства на другой наподобие волны.

Уильям Клиффорд, «О пространственной теории материи» (1876)

Символом нашего физического мира не может быть устойчивое и периодическое движение планет, что лежит в основе классической механики. Это мир неустойчивостей и флуктуаций, в конечном счете ответственных за поразительное разнообразие и богатство форм и структур, которые мы видим в окружающей нас природе.

Г. Николис и И. Пригожин (1990)

В 1994 году Национальный научный фонд США выделил деньги на строительство двух детекторов гравитационных волн, расположенных на расстоянии 3 тысяч километров друг от друга (в штатах Вашингтон и Луизиана). Каждый детектор LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) представляет собой лазерный интерферометр из двух перпендикулярных вакуумированных туннелей («плечей») по 4 км каждый, в которых распространяется лазерный луч, отражающийся между свободно подвешенными зеркалами.

LIGO был построен с прицелом на поэтапное улучшение чувствительности с выходом на проектную мощность в 2021 году. Первые наблюдения начались в 2002 году, но до 2010 гравитационных волн зарегистрировано не было. Последующий проект усовершенствования LIGO занял несколько лет, и в середине сентября 2015 года новая версия детектора, которая была в 4 раза чувствительнее предыдущей, начала наблюдения. К этому моменту общая стоимость проекта превысила 600 миллионов долларов. Уже через два дня наблюдений новый детектор впервые в истории поймал гравитационную волну от слияния двух черных дыр с массой в 29 и 36 масс Солнца, расположенных от нас на расстоянии 1.6 миллиарда световых лет. Сигнал был зарегистрирован сразу на обоих детекторах LIGO. В результате слияния образовалась черная дыра массой в 62 массы солнца, а на генерацию гравитационных волн ушло 5% от суммарной массы сливающихся дыр. Мгновенное превращение 3 масс солнца в гравитационное излучение сразу перевело вопрос о природе гравитационной энергии в разряд актуальных проблем. Потому что слияний черных дыр во Вселенной может быть очень много, следовательно, переход значительной доли их массы в гравитационные волны должен учитываться при построении космологических моделей, как резонно отметил в 2018 году нобелевский лауреат Филип Андерсон.

В декабре 2015 года LIGO зарегистрировал гравитационную волну от еще одного слияния черных дыр, после чего всплески гравитационного излучения стали регистрироваться регулярно.

Официальное сообщение об открытии гравитационных волн детекторами LIGO было сделано 16 февраля 2016 года на пресс-конференции, на которую собралось множество журналистов и ученых.

Кипу Торну, Райнеру Вайссу и Берри Беришу за обнаружение гравитационных волн на детекторах LIGO была присуждена Нобелевская премия по физике за 2017 год. К 2022 году детекторы LIGO зарегистрировали 90 всплесков гравитационных волн, многие из которых были подтверждены французско-итальянским детектором Virgo, расположенным в Италии и имеющим трехкилометровые плечи. В программу

наблюдения гравволн включились японский детектор KAGRO и британско-немецкий инструмент GEO600. В конце 2022 года гравитационные детекторы, пройдя очередную модернизацию, начнут новую серию наблюдений. Чувствительность новых версий гравитационных детекторов будет такова, что они должны регистрировать в неделю около 5 событий слияний черных дыр (и нейтронных звезд). Буквально на наших глазах рождается гравитационно-волновая астрономия, которая кардинально меняет представления о Вселенной.

Результаты LIGO не просто подтвердили предсказанные ОТО гравитационные волны. Они принесли много неожиданного. LIGO поразили ученых частотой регистрируемых событий: оказывается, в космосе существует большое количество невидимых черных дыр! При этом их типичная зарегистрированная масса оказалась в десятки масс солнца, или в несколько раз больше, чем у обычных дыр звездных масс, наблюдаемых в двойных звездных системах с аккреционными дисками. Сразу несколько авторов (А. Кашлинский, С. Берд, А. Рисс и другие) выдвинули в 2016 году предположение, что темная материя состоит из большого количества черных дыр звездных масс. В качестве объяснения темной материи черные дыры обладают, по сравнению с ВИМПами, следующими преимуществами:

1. Черные дыры существуют – в полном соответствии с предсказанием ОТО и современными наблюдениями.
2. Они настолько темны, что их прямое наблюдение действительно очень затруднительно. Их находят лишь по свечению аккреционных дисков (которые возникают, только если черная дыра входит в двойную систему со звездой или поедает целые звезды в центре галактик), по излучению гравитационных волн (метод стал доступен только с 2015 года) и по гравитационному линзированию.
3. Черные дыры, возникшие в результате коллапса звезд, логично имеют небольшие скорости, сопоставимые со скоростями, например, шаровых скоплений в гало галактик.
4. У черных дыр столь малый размер или сечение рассеяния, что два галактических гало из черных дыр при столкновении будут взаимодействовать практически

только гравитационно – в отличие от газовых составляющих галактик. Это объясняет феномены типа скопления Пули (см. иллюстрации 5 и 6).

Но откуда взялось такое количество черных дыр? Обычные модели звездной эволюции не могут его объяснить. Еще одной проблемой является большое количество сверхмассивных черных дыр, которые расположены в центрах галактик, и, как сейчас считают многие ученые, могут отвечать за их образование.

Чтобы объяснить наблюдаемое распределение черных дыр по массам, все больше физиков обращаются к гипотезе о первичных черных дырах, которые формируются из флуктуаций плотности в процессе Большого взрыва. Эта идея обсуждается с 1960-х годов (см. труды С. Хокинга, Я.Б. Зельдовича, И.Д. Новикова, А.Д. Долгова).

Смелую гипотезу выдвинули в 2011 году британец Бернард Карр (B. Carr) and Алан Коли (A. Coley) из Канады. Они предположили, что черные дыры могут попадать к нам из предыдущего цикла Вселенной, потому что черные дыры — это такие макроскопические объекты, которые могут пережить коллапс мира и, пройдя через огненную фазу максимально сжатой Вселенной, попасть в следующий цикл ее жизни. Будем называть эти дыры из прошлых циклов «реликтовыми», чтобы отличить от гипотетических «первичных» дыр, которые могут образовываться в момент Большого взрыва из флуктуаций.

Итак, темная материя, которой в пять раз больше, чем обычного газа и звезд, все еще остается загадкой, которую предстоит решить. И все больше ученых склоняется к мнению, что решение надо искать среди уже открытых черных дыр, а не среди гипотетических (и чрезвычайно «неуловимых») элементарных частиц.

9.3 Космологическая важность гравитационного излучения

Великая истина – это такая истина, отрицание которой есть также великая истина.

Нильс Бор

Гравитация Вселенной зависит как от массы вещества, так и излучения. Но в процессе расширения Вселенной до радиуса R , плотность космического вещества падает как $1/R^3$, а плотность энергии излучения уменьшается как $1/R^4$, благодаря дополнительному эффекту Доплера, который вызывает красное смещение $1/R$ у любой волны в расширяющейся Вселенной.

Еще Р. Толмен предполагал необходимым построения модели Вселенной с переменной массой вещества. Он писал в 1934 году: «...было бы желательно допустить некоторые изменения собственной массы вещества, заключенной внутри модели, так как изменения подобного рода в реальной Вселенной, по-видимому, происходят».

Космологическая модель с переменной массой рассматривалась также Ф. Хойлом.

Вопрос о построении моделей Вселенной с переменной массой приобрел особую актуальность после открытия LIGO огромной популяции черных дыр. Ведь если темная материя образована из черных дыр, то это фактически означает, что они являются основной гравитирующей компонентой Вселенной. Это одновременно повышает значимость гравитационного излучения, на которое тратится заметная доля массы сливающихся дыр.

Существует мнение, что гравитационное излучение, благодаря низкой эффективности взаимодействия с материей, не может играть заметной роли в космологии. Это неверно.

Важность гравитационных волн в космологии определяется не их прямым воздействием на вещество, а тем, что фон гравитационного излучения может служить энергетическим резервуаром Вселенной. При взаимодействии с этим фоновым «аккумулятором», черные дыры могут набирать свою энергию и массу, а при взаимных слияниях – сбрасывать свою массу в этот резервуар. А переменность массы черных дыр, которые могут быть главным конструкционным материалом нашего мира, непосредственно влияет на динамику Вселенной. Если гравитационное излучение не имеет гравитационной массы, то его во Вселенной может быть очень много – в виде накопленного фонового излучения. По энергии (или, точнее, «псевдоэнергии») эта компонента может доминировать во Вселенной.

Подтверждение существования мощного фона гравитационных волн наногерцового диапазона получено в 2020-2021 годах радиотелескопами NANOGrav и PPTA.

Если с детекторами типа LIGO гравитационные волны взаимодействуют слабо и отдают им только часть своей псевдоэнергии, то с черными дырами гравитационные волны взаимодействуют с максимальной, 100%-ой эффективностью. С точки зрения внешнего наблюдателя, падение гравитационной волны на черную дыру выглядит как сложное взаимодействием стационарного гравитационного поля дыры и переменного гравитационного поля волны, которое, в конечном счете, сливается с полем дыры, усиливая его. С точки зрения наблюдателя, падающего вместе с гравитационными волнами на черную дыру, они беспрепятственно проникают в нее вместе с наблюдателем. Радиус черной дыры должен быть одинаков с точки зрения, как внешнего, так и внутреннего наблюдателя. Следовательно, с точки зрения наблюдателя, попавшего в черную дыру, гравитационные волны внутри нее уже внесли свой вклад (возможно, доминирующий) в массу данной дыры. Это интересный феномен: гравитационные волны, не обладающие локальной гравитационной массой, тем не менее, вносят свой вклад в глобальную массу черной дыры, внутрь которой они попадают. То есть, низкая плотность наблюдаемого вещества Вселенной, недостаточная для ее замыкания (или превращения в черную дыру), не означает, что Вселенная на самом деле незамкнута, ведь недостающую гравитационную массу для нее могут обеспечить гравитационные волны.

Физик-теоретик Филип Андерсон (1923-2020) получил Нобелевскую премию в 1977 году. Он обладал выдающимся интеллектом и широким кругозором, сделав открытия в целом ряде областей физики от высокотемпературной сверхпроводимости до физики элементарных частиц. После открытия гравитационных волн на детекторе LIGO, Ф. Андерсон в 2018 году опубликовал статью о необходимости рассмотрения модели Вселенной с переменной гравитационной массой. Аналогичную мысль высказал и нобелевский лауреат Джон Мазер (см. Предисловие). Таким образом, построение модели Вселенной с переменной гравитационной массой чрезвычайно актуально.

9.4 Вселенная внутри черной дыры

*Каждый раз, когда я читал лекции о черных дырах, меня всегда спрашивали, что случается с тем, что попадает в черную дыру. Короткий ответ: мы не знаем.
Поль Дэвис (1994)*

На фоне растущего разочарования одноразовой квантовой моделью Вселенной, активизировались усилия по созданию циклических космологических моделей. Среди авторов таких моделей отметим Р. Пенроуза, Н. Поплавского, П. Стейнхарда и Н. Турока. Отметим, что циклическая космология позволяет естественно объяснить наблюдаемое большое количество черных дыр, если они являются реликтовыми и накапливаются из цикла в цикл (хотя требуется построение конкретной модели такого накопления). Среди опубликованных циклических моделей наиболее обоснованно выглядит модель Поплавского, согласно которой Вселенная пульсирует в огромной черной дыре. Такую модель предлагали и раньше, но Поплавский подвел под нее солидное математическое обоснование. Механизм Большого взрыва он строит на основе не ОТО, а неэйнштейновской теории, в которой существует сильное отталкивание на основе торсионного поля.

Насколько возможно существование Вселенной в черной дыре? Обычно черные дыры принято демонизировать, особенно в научно-популярной литературе, которая живописует их как сверхплотных пожирателей вещества, которые затягивают в себя зазевавшихся астронавтов, при этом беспощадно растягивая их приливными силами (этот процесс даже получил зловещее название «спагеттификация»). На самом деле, сверхплотными являются только черные дыры звездных масс. Сверхмассивная черная дыра, например, дыра в сто миллионов солнечных масс в центре Андромеды, обладает очень скромной плотностью - всего в 1.8 раз больше, чем у воды. А крупные галактические дыры, достигающие массы в 10^{10} масс солнца, имеют плотность в 7 раз меньше плотности воздуха. Приливные силы на границе черной

дыры в 30 масс солнца и радиусом в 100 км (типичной для популяции, открытой на обсерватории LIGO), действительно, достигают миллиона земных ускорений g , зато на границе черной дыры в 4 миллиона масс Солнца в центре нашего Млечного Пути, это приливное ускорение незаметно и составляет всего $10^{-4} g$.

Безусловно, черные дыры – весьма необычные объекты. Время на их поверхности останавливается с точки зрения внешнего наблюдателя, следовательно, сколько бы он не посылал исследовательских зондов с задачей проникнуть в черную дыру, они будут навечно застревать на ее границе, как мухи в янтаре. Отметим, что, с точки зрения внешнего наблюдателя, такие зонды могут попасть в черную дыру, только если она сама расширится и проглотит их. Знаменитый парадокс черной дыры заключается в том, что мнение внешнего наблюдателя кардинально отличается от точки зрения падающего наблюдателя, который, по своим часам, быстро проникает внутрь черной дыры. Это означает, что в последнюю долю секунды по часам наблюдателя, пересекающего границу черной дыры, история внешнего наблюдателя должна закончиться, а время вдали от черной дыры должно достичь бесконечности. Отсюда можно сделать ошеломительный вывод, что при дальнейшем движении наблюдателя внутри черной дыры, время внешнего наблюдателя будет больше бесконечности!

Этот парадокс имеет место только в идеальной системе с невесомым наблюдателем. Поверхность стационарной черной дыры представляет собой барьер из бесконечно медленного времени, которое растягивает время наблюдателя: даже двигаясь со скоростью света, он не может преодолеть этот барьер. Но нет никаких ограничений на движение самого барьера. Следовательно, если дыра растет, поглощая вещество или гравитационные волны из окружающей среды, то падающий наблюдатель вблизи дыры будет быстро ею поглощен, даже по часам внешнего наблюдателя. Поэтому в данном случае парадокс внешнего времени «большего, чем бесконечность» не возникает. Но он не возникает, даже если дыра не растет из-за аккреции, потому что наблюдателей без массы (или без энергии) не существует. Следовательно, любой «наблюдатель», даже в виде

отдельной элементарной частицы, подлетев к самой поверхности черной дыры, вызовет дополнительную гравитацию в данном месте, отчего поверхность черной дыры должна образовать бугор и проглотить наблюдателя – за конечное время для внешнего наблюдателя. Таким же способом, только гораздо более очевидным, сливаются черные дыры сравнимых масс: при их сближении образуется общий горизонт событий, который охватывает обе дыры. Этот горизонт несимметричный, но, после вспышки гравитационного излучения, он выравнивается и становится сферой.

Что происходит с астронавтом внутри черной дыры? Вот как судьба частицы, пролетающей границу сферы Шварцшильда, описывается, например, в книге И. Б. Хриповича, написанной на основе лекций в Новосибирском госуниверситете («Общая теория относительности», 2002): «...частица достигает сферы Шварцшильда за конечное собственное время... При этом вблизи гравитационного радиуса скорость частицы по собственному времени стремится к c [скорости света]. После того, как частица пересечет сферу Шварцшильда, она движется к центру $r = 0$ и достигает его также за конечное время. Здесь, при $r < r_g$, g_{00} становится отрицательным, а g_{rr} – положительным. Иными словами, внутри сферы Шварцшильда t становится пространственноподобной координатой, а r – времениподобной! Движение частицы при $r < r_g$ показывает, как течет «время» r в этой области: оно течет в начало координат $r = 0$. Но это означает, что даже если попытаться, скажем, включив ракетный двигатель, изменить при $r < r_g$ направление движения частицы на обратное, то это не удастся, каким бы мощным ни был двигатель. Внутри сферы $r = r_g$ движение возможно только к центру. Таким образом, сфера Шварцшильда – это горизонт событий, односторонний клапан, не пропускающим наружу, к удаленному наблюдателю, никаких сигналов. Отсюда и название такого объекта – черная дыра».

С нашей точки зрения, рассуждения о «времени», «текущем к нулевому радиусу», физически бессмысленны. Такой подход делает патологическим движение частицы внутри черной дыры любой плотности. Крупнейший специалист в области черных дыр, нобелевский лауреат Роджер Пенроуз, относится к тем ученым, кто не рассматривает черную дыру как область

патологической динамики. Он приводит такой изящный мысленный эксперимент по созданию изнутри черной дыры или «максимальной ловушечной поверхности»: «Технически развитые (но, по-видимому, безрассудно храбрые) существа населяют галактику (предпочтительно эллиптическую), содержащую около 10^{11} звезд. С помощью ракет эти существа ухитрились изменить скорости звезд, причем так, что ...все звезды падают в направлении центра и должны достигнуть его окрестности почти в одно и то же время. ...Размер области, в которой должны собраться звезды, приблизительно в 50 раз больше размера солнечной системы. В таком объеме достаточно места для всех звезд, и они могут там собраться раньше, чем возникнет опасность столкновений. (Если угодно, они могут двигаться так, чтобы избежать столкновений вообще!) Но приведет ли это к развитию ловушечной поверхности? Неизбежность этого доказывается простыми рассуждениями».

Далее математик Пенроуз рассматривает вспышку света в центре эллиптической галактики «храбрых существ» и доказывает, что свет развернется на краю такой галактики, которая превратилась в черную дыру или замкнутую Вселенную, и начнет сходиться опять. Ученый подчеркивает: «Этот пример показывает, что нет причин, по которым наблюдатель должен быть «уничтожен» после того как он попал в критическую область. В окрестности ловушечной поверхности кривизна все еще чрезвычайно мала, а пространство-время совершенно регулярно». (Р. Пенроуз «Структура пространства-времени», 1972).

Очевидно, что этот эксперимент Пенроуза идет вразрез с рассуждениями некоторых авторов о перемене времени и пространстве внутри черной дыры, и о неудержимом катастрофическом сжатии всего содержимого черной дыры в нулевую точку сингулярности.

Автору неизвестно, кто первый запустил в научный обиход эту мистическую перестановку времени и радиуса внутри черной дыры, но понятно, откуда растут ноги у этой идеи. В теории относительности квадрат пространственно-временного интервала (расстояния между двумя точками в пространстве-времени) равен сумме квадратов интервалов всех координат, умноженных на метрический тензор g_{ik} (см. Приложение II):

$ds^2 = -g_{00}dt^2 + g_{11}dr^2 + \dots$. В простом случае плоского (то есть, когда все компоненты метрического тензора g_{ik} равны единице) двумерного пространства, это выражение аналогично теореме Пифагора. Квадрат 4-х мерного интервала заметно сложнее квадрата гипотенузы школьного треугольника: квадрат координаты времени входит в него со знаком минус, в то время как три квадрата пространственные координаты – со знаком плюс. Набор знаков в сумме компонент интервала (-+++), называется сигнатурой метрики. Первый знак минуса в сигнатуре означает, что время является мнимой координатой относительно осей реальных пространственных координат, к которым оно перпендикулярно. В выражение пространственно-временного интервала в метрике Шварцшильда входят величины типа $1 - X$ и $1/(1 - X)$. Вне черной дыры $X < 1$, внутри $X > 1$. Граница Шварцшильда означает $X = 1$, и смену знаков перед квадратами радиальной и временной координаты (см. Приложение II). Сигнатура метрики «портится»: (+-++). Строго говоря, если внутри черной дыры квадрат времени становится отрицательным, то само время становится мнимым (как и радиальная координата). Переход между реальным и мнимым временами непривычен для физиков, и они его избегают. Поэтому, вместо признания мнимого времени, многие физики ухватились за идею переобозначения радиуса как времени, а времени - как радиуса. Это восстанавливало правильную сигнатуру метрики (-+++), но дорогой ценой - вызывало патологическую динамику движения тел внутри черной дыры и физически непристойные утверждения типа «время течет к началу координат». Если же ввести мнимое время и мнимые координаты внутри черной дыры, то сохраняется обычная сигнатура (-+++).

В модели Пенроуза звезды падают к центру эллиптической галактики, что аналогично коллапсу. Но такое сжатие совсем не обязательно для внутреннего пространства черной дыры. Проведем следующий мысленный эксперимент по созданию замкнутой вселенной. Пусть в центре модельной вселенной располагается наш Млечный Путь. Добавим вокруг нашей Галактики сферический слой с такой же массой. Наблюдатель на внешней границе этого слоя будет испытывать притяжение, как самого слоя, так и Галактики. Но для нас, жителей Млечного

Пути, добавление внешнего сферического слоя ничего не изменит – скорость движения Солнца вокруг центра Галактики, а также динамика всех звезд и планет сохранится прежней. Этот факт независимости внутреннего наблюдателя от внешних сферических слоев доказывается как в теории Ньютона, так и в теории Эйнштейна. Начнем наращивать вокруг нашего зародыша вселенной внешние слои – с увеличивающимся радиусом и, для удобства, с той же плотностью, что и первый слой. Последовательно перемещая наблюдателя на поверхность самого внешнего слоя, мы убеждаемся в постоянном увеличении массы нашей вселенной. Но для жителей Млечного Пути по-прежнему ничего не будет меняться – они не чувствуют притяжения внешних слоев. Внутренний наблюдатель оказывается равнодушен к внешнему миру. Наблюдатель на самом внешнем слое, наоборот, будет с тревогой наблюдать за ростом гравитационного притяжения, которое будет воздействовать даже на луч его фонарика – свет будет загигаться и падать на поверхность слоя. Наступает момент, когда в космос может улететь только луч, направленный строго вверх. Но вот к массе вселенной добавлен самый последний слой, который может составлять совершенно ничтожную относительную долю массы вселенной, но именно он замкнет ее и превратит в черную дыру, согласно метрике Шварцшильда. А наблюдатель на границе вселенной увидит, что даже вертикальный луч фонарика не может улететь с поверхности последнего слоя. Но для жителей Млечного Пути в центре мира это ничтожное приращение внешнего сферического слоя на краю мира останется по-прежнему незамеченным. Предположить, что из-за незначительного увеличения массы внешних областей вселенной, динамика ее внутренней части кардинально изменится: что Солнце и звезды сорвутся со своих орбит и устремятся к центру галактики, где находится центр нашей модельной вселенной – это значит вступить в противоречие не только с общей теорией относительности, но и со здравым смыслом.

Безусловно, в замкнутой Вселенной ее самые внешние слои не могут удержаться в равновесии – и начнут падать к ее центру, но это движение описывается обычной динамикой, без каких-либо «времен, стремящихся к нулевому радиусу».

В мнимом времени нет ничего патологического – ведь для обитателя черной дыры его время реально, а время внешнего наблюдателя – мнимое. Как это будет выглядеть для падающего наблюдателя, который проникает из внешнего мира внутрь черной дыры? Рассмотрим расположенную в пустоте черную дыру с равномерной плотностью ρ , в которую падает наблюдатель. Его время всегда реально. Когда он вычисляет (или измеряет, если сможет) для покоящейся системы отсчета скорость времени, текущего снаружи его корабля, то видит, что это «внешнее» время убыстрится на границе черной дыры до бесконечности. Но как только наблюдатель пересекает границу черной дыры с равномерной плотностью, то вычисления покажут ему, что гравитация самого внешнего слоя черной дыры перестает на него действовать, а гравитации внутренней части дыры не хватает для ее замыкания. Ведь чем меньше черная дыра, тем больше должна быть ее плотность. Следовательно, из любой внутренней части черной дыры невозможно сделать черную дыру меньшего размера – и черной дырой однородной плотности может быть только вся эта дыра целиком. Чем дальше движется наблюдатель к центру дыры, тем меньше тяготение внутренней сферы.

Как соотносится время в центре черной дыры и время внешнего наблюдателя на галилеевской бесконечности? Рассмотрим шар из разреженного вещества (или из звезд). Плотность этого шара далека от той, что нужна для создания черной дыры такого же размера. Скорость времени внешнего наблюдателя на бесконечности близка к скорости времени наблюдателя в центре шара. Начнем сжимать данный шар. Время наблюдателя в его центре зависит от гравитационного потенциала, который определяет скорость течения времени и может быть измерен по гравитационному смещению частоты фотона. Потенциал на бесконечности равен нулю, а в центре шара он отрицателен и минимален. Если запустить из центра шара фотон с какой-то частотой, то на бесконечности его частота будет меньше. Это означает, что время в сфере течет медленнее, чем на бесконечности. При определенной степени сжатия на границе сферы возникнет поверхность черной дыры с нулевой скоростью времени с точки зрения внешнего наблюдателя. Интересно, что с точки зрения наблюдателя в центре шара, на его

границе скорость времени будет максимальной (на краю шара длина волны фотона, запущенного из его центра, растянется в бесконечность). Минимальной скоростью будет обладать время наблюдателя в центре дыры.

Фактически, поверхность черной дыры соответствует разрыву в скорости времени, где эта скорость снаружи разрыва устремляется к нулю, а изнутри – к бесконечности. Сопоставить времена в центре черной дыры и на галилеевой бесконечности уже будет невозможно, что отражается в относительной мнимости этих времен.

Мысленные эксперименты, построенные на общей теории относительности и решении Шварцшильда, убедительно показывают, что ОТО допускает построение космологии Вселенной в черной дыре. Назовем эту самую большую дыру «мегадырой». Жизнь в черной дыре вполне возможна – и мы этому живое доказательство. Никодем Поплавский из США рассматривает Вселенную внутри черной дыры как объект в обычном пространстве, без всяких драматических падений к центру.

Айзек Азимов, который был активным популяризатором науки, в своей научно-популярной книге 1978 года «Коллапсирующая Вселенная» поразительно точно, с нашей точки зрения, описал модель Вселенной в черной дыре: «Вполне возможно, что вся Вселенная сама по себе является черной дырой (как предположил физик Кип Торн). Если это так, то, скорее всего, это всегда была черная дыра и всегда будет черной дырой. Если это так, мы живем в черной дыре, и, если мы хотим знать, каковы условия в черной дыре (при условии, что она чрезвычайно массивна), нам нужно только посмотреть вокруг. Таким образом, когда Вселенная схлопывается, мы можем представить себе образование любого количества относительно небольших черных дыр (черных дыр внутри черной дыры!) с очень ограниченными диаметрами. Однако в последние несколько секунд окончательного катастрофического коллапса, когда все черные дыры сливаются в одну космическую черную дыру, радиус Шварцшильда скачком расширяется все дальше и дальше - к краю известной вселенной. И не исключено, что в пределах радиуса Шварцшильда есть возможность взрыва. Может случиться так, что, когда радиус Шварцшильда в

мгновение ока удаляется на миллиарды световых лет, космическое яйцо в самый момент образования стремительно расширяется наружу, чтобы следовать за ним, и это большой взрыв. Если это так, ...то Вселенная не может быть открытой при любых текущих данных, поскольку Вселенная не может расширяться за пределы своего радиуса Шварцшильда. Каким-то образом расширение должно прекратиться в этот момент, а затем все неизбежно должно снова сокращаться и запускать цикл заново» («The Collapsing Universe»).

Азимов размышляет о сверхсветовом расширении границы самой массивной дыры. Отметим, что это не запрещено специальной теорией относительности, потому что сфера Шварцшильда – не материальная поверхность.

Анализ, учитывающий кривизну пространства, показал, что данные спутника WMAP, а также спутника «Планк» с вероятностью >99% указывают на положительную кривизну Вселенной, что допускает ее замкнутость. Это противоречит предсказанию теории инфляции о нулевой кривизне, что вызвало дискуссию о кризисе в космологии (Eleonora Di Valentino, Alessandro Melchiorri & Joseph Silk, "Planck evidence for a closed Universe and a possible crisis for cosmology", Nature Astronomy, 2020). Рис. 2, показывающий, что Λ CDM космология в замкнутом пространстве лучше соответствует данным «Планка», чем Λ CDM космология в плоском пространстве, взят из диссертации Лукаса Хергта, которую он защитил в Кембридже в 2020 году (часть диссертации превратилась позже в статью Hergt et al., 2022). Хергт отмечает: «Несмотря на успех плоской Λ CDM космологии, наблюдается постоянная тенденция к положительной кривизне (замкнутым вселенным) в данных о температуре и поляризации реликтового излучения. В частности, выпуск данных «Планка» за 2018 год вызвал дискуссии о возможных доказательствах пространственной кривизны, найденных в реликтовом излучении». Можно подумать, что новый параметр кривизны усложняет космологическую модель, но Хергт отмечает, что появление кривизны ограничивает другие космологические параметры, что означает «меньшую сложность модели».

Данные о замкнутости пространства согласуются с теоретической моделью Вселенной в черной дыре. Если

Вселенная расширяется в черной дыре, то становится понятной причина смены расширения на сжатие, потому что за границу черной дыры вещество или излучение не может проникнуть. Но для построения космологии Вселенной, пульсирующей внутри мегадыры, нужно ответить на следующие вопросы:

1. Каков механизм Большого взрыва?
2. Как избавиться от сингулярности при гравитационном коллапсе?
3. Почему Вселенная так однородна и изотропна?
4. Какова природа ускоренного расширения Вселенной (проблема космологической постоянной или темной энергии)?
5. Как образовался наблюдаемый спектр черных дыр, отвечающих за темную материю и образование галактик?
6. Почему барионная масса, темная материя и темная энергия сопоставимы по величине?
7. Как решается проблема роста энтропии в циклической Вселенной? Почему в замкнутой Вселенной не наступает «тепловая смерть»?

При этом мы полагаем, что на все эти вопросы, а также на другие, которые возникают при построении модели Вселенной или при интерпретации космологических наблюдений, можно ответить в рамках общей теории относительности (потому что другой теории гравитации не существует) и без введения неизвестных современной науке сущностей: частиц, полей, размерностей и т.д. При таких ограничениях эти вопросы кажутся неразрешимыми, но только если считать, что их должны решить теоретики. На самом деле, если наше предположение о циклической природе Вселенной верно, то природа давно «решила» эти вопросы. Роль теоретиков в таком случае сводится к роли не «творцов» новых фантастических моделей, а «летописцев», которые должны внимательно присмотреться к имеющимся решениям природы и записать их привычным языком науки. Как справедливо заметил Ричард Фейнман: «...изобретательность природы больше, гораздо больше изобретательности человека» («Какое тебе дело до того, что думают другие?», 2001).

Глава 10. Механизм Большого взрыва и решение проблемы сингулярности

Всякая форма, как бы ни была она полезна в прошлом, может оказаться слишком узкой для того, чтобы охватить новые результаты.

Нильс Бор

10.1 Переменная гравитационная масса и метрика Кутчеры

Чтобы понять физические законы, вы должны усвоить себе раз и навсегда, что все они – в какой-то степени приближения.

Ричард Фейнман

В разделе 4.2 была рассмотрена сферическая система из двойных черных дыр неравных масс, которая разлетается в разные стороны под воздействием антигравитирующего потенциала, возникающего после слияния черных дыр (рис. 1). Можно ли получить подобный потенциал для коллапсирующей системы, чтобы обеспечить ее остановку и последующее расширение? В короткой заметке, опубликованной мной в мае 2003 года в Бюллетене Американского астрономического общества, показано, что если масса системы, расположенной в воронке гравитационного потенциала, уменьшается, то в центре воронки вырастает пик гравитационного потенциала, на склоне которого будет отталкивание, а не притяжение. Если учесть, что этот пик расширяется со скоростью света, то получится, что вокруг системы с уменьшающейся массой будет существовать удаленные зоны притяжения и более близкие зоны, где наблюдается отталкивание. В заметке отмечалось, что интенсивная генерация гравитационного излучения может вызвать нужное уменьшение массы системы.

Хотя в основном тексте этой книги мы избегаем формул, сделаем исключение из этого правила для нескольких простых, но очень важных уравнений. В теории Ньютона гравитационное

ускорение g , вызванное телом с массой M на расстоянии r , можно записать через потенциал φ :

$$g = -\frac{\partial\varphi}{\partial r}, \text{ где } \varphi = -\frac{GM}{r}, \quad (1)$$

где $G = 6.67 * 10^{-8}$ дин * см²/Г² – фундаментальная гравитационная постоянная. Предположим, что масса M зависит от времени. Конечность скорости распространения гравитационного поля порождает дополнительную зависимость и от пространства, ведь об изменении массы гравитирующего тела удаленный наблюдатель будет узнавать позже близкого наблюдателя. Примем для изменения массы экспоненциальную функцию, которая, в зависимости от знака показателя α , может описывать как уменьшение, так и увеличение массы (Gorkavui, 2003):

$$M = M_0 e^{-\alpha(t-\frac{r}{c})} \quad (2)$$

После дифференцирования потенциала φ с переменной массой (2) получим для гравитационного ускорения:

$$g \approx -\frac{GM(t-r/c)}{r^2} + \frac{\alpha GM(t-r/c)}{c r} \quad (3)$$

Физический смысл запаздывания $t - r/c$ состоит в следующем: если в точке $r = 0$ происходит изменение массы, то наблюдатель, расположенный в той же точке, почувствует это изменение немедленно, и для него изменение массы будет описываться простой функцией $M(t)$. Если наблюдатель расположен на расстоянии r от изменяющейся массы, то волна этого изменения достигнет наблюдателя через промежуток времени, равный r/c . Это означает, что для удаленного наблюдателя масса системы будет изменяться с запаздыванием во времени, которое будет тем сильнее, чем больше расстояние r , то есть переменность массы будет зависеть не только от времени, но и от расстояния до наблюдателя: $M(t - r/c)$.

При $\alpha > 0$ (уменьшение массы) новый член гравитационного ускорения из формулы (3) описывает «антигравитацию», а при $\alpha < 0$ (увеличение массы) – «гипергравитацию». Отметим, что новый член гравитационного ускорения, в отличие от классического ньютоновского члена притяжения, имеет релятивистский характер и в классическом

пределе (при устремлении скорости света c к бесконечности) исчезает. Так как новый член падает с радиусом медленнее ньютоновского притяжения - как r^{-1} , а не r^{-2} , то он должен доминировать на больших расстояниях и космологических масштабах. Для $\alpha > 0$ условие доминирования отталкивания над притяжением запишем из (3) в виде:

$$t_d = \frac{1}{\alpha} < \frac{Mr}{M_*c} \quad (4)$$

где M_* - общая масса системы, включая ее компоненты, которые не меняют свою массу, а M – переменная масса системы, которая уменьшает свою массу с характерным временем t_d , и может быть гораздо меньше M_* .

Проясним возникновение описанного гравитационного отталкивания (или антигравитации) с помощью классической аналогии, когда искривленное пространство моделируется резиновой пленкой, натянутой на большой обруч. Если в середину этой пленки поместить тяжелый металлический шар, то он растянёт пленку и образует воронку, которая искривляет траектории двигающихся по пленке легких шариков – так же как искривленное пространство вокруг планеты изгибает траектории пролетающих возле планеты тел. Пусть тяжелый шар приклеен к пленке. Быстро поднимем шар на уровень обруча или неискривленной пленки. Пленка, которая устремится за шаром, вытянется в конусообразную возвышенность в середине существующей большой воронки. Вдали от этого острого конуса пленка все еще имеет форму воронки: хотя шар уже поднят, дальние части пленки об этом еще «не знают» из-за конечности скорости распространения изгиба пленки. Центральная возвышенность на пленке будет быстро расширяться от центра к краям со скоростью движения изгибающей волны. Расположим несколько легких шариков на поверхности пленки. При быстром поднятии центрального тела, поведение этих шариков будет отмечать две области вокруг центра – далекие области, где пленка еще не узнала о подъеме центрального шара, и где по-прежнему царит притяжение, и близкие области, где пленка образовала центральную возвышенность, с которой шарики скатываются к периферии. Здесь возникла зона антигравитации – зона, где гравитационный потенциал (прогиб пленки) имеет наклон наружу. Чем быстрее будет подниматься тяжелый шар, то есть исчезать гравитационная масса рассматриваемой системы,

тем острее будет центральный пик и сильнее антигравитация. Таким образом, если притяжение аналогично движению шариков по наклонной поверхности внутрь воронки, то антигравитация соответствует разбеганию шариков со склонов центрального пика.

Наглядную иллюстрацию возникновения антигравитационного центрального пика дает компьютерная симуляция, которую Диана Коверн использовала для демонстрации гипотетической ситуации исчезновения Солнца в Солнечной системе – см. рисунок 3. Эта картинка была создана для иллюстрации того, что наша Земля будет двигаться по своей круговой орбите 1 еще восемь минут после исчезновения Солнца, пока гравитационный сигнал о судьбе нашего светила не достигнет земной орбиты. Потом, согласно симуляции, Земля должна начать двигаться по касательной 2 к своей орбите. Так грузик, который крутили на веревочке, после обрыва веревочки отправляется в полет по касательной. Но симуляция ясно показывает, что на склоне центрального расширяющегося пика будет наблюдаться антигравитация, а это значит, что Земля полетит не по касательной к своей орбите, а по кривой 3, отклоняющейся наружу, с учетом антигравитационного ускорения.

Формулы (2) и (3) получены в рамках квазиньютоновского подхода: в ньютоновской формуле (1) была учтена переменность массы и конечность скорости гравитации. Это нестрогий прием, поэтому аналогичные формулы для гравитационного ускорения требуется получить в рамках ОТО.

Общие выражения ОТО для нестационарной сферическо-симметричной метрики были выведены Ж. Леметром в 1931 году, а также Р. Толменом и В. Подольским - см. параграф 98 в книге Толмена (1934). Но нестационарная сферическо-симметричная метрика не была изучена детально, потому что для такого анализа требуется знать переменность гравитационной массы. Переменность массы не получается из уравнений ОТО для интегральной метрики, она должна быть найдена из других расчетов - также, как задается уравнение состояния вещества при получении пространственно-временной метрики для системы с учетом давления. Если рассматривать убыль гравитационной массы из-за излучения гравитационных волн, то можно

вычислить это изменение в рамках ОТО для определенного начального распределения масс, а потом подставить полученные выражения в интегральную метрику. Принципиальное рассмотрение физики системы можно начать с введения параметрической функции изменения массы, как это сделано в формуле (2).

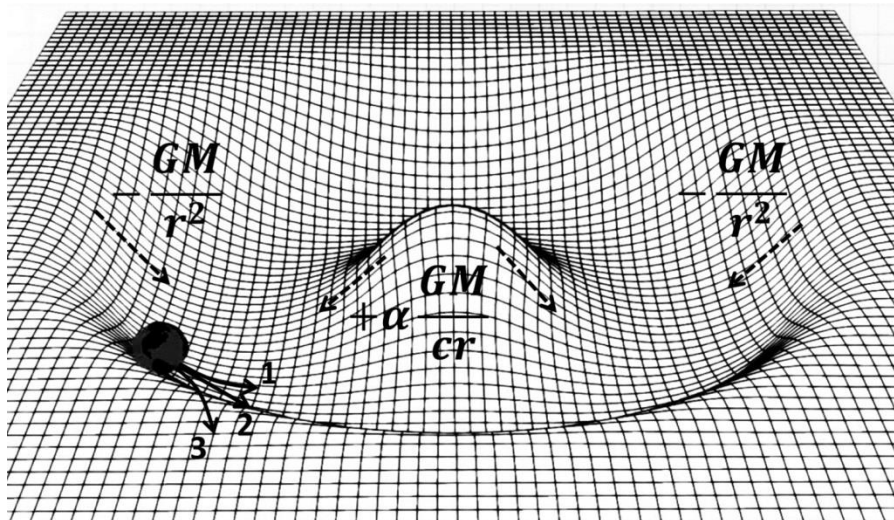


Рис. 3. Антигравитационный пик на месте исчезнувшего Солнца. Земля обозначена темным шариком на склоне. Штриховые стрелки отмечают движение легких шариков. (Использован рисунок из лекции Д. Коверн, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=DjcS1kRkc6M>)

Профессор Ягеллонского университета Марек Кутчера из Кракова опубликовал в сентябре 2003 года в журнале Королевского астрономического общества (MNRAS) статью «Монопольные гравитационные волны от релятивистских фэйрболов, вызывающих гамма-всплески», где рассмотрел расширение раскаленных облаков газа с переменностью активной гравитационной массы, вызванной изменением давления в фэйрболе.

Кутчера сделал заключение: «гравитационная масса огненного шара, составленная в равной степени из плотности энергии и давления, не является постоянной величиной. Это

имеет серьезные последствия, поскольку подразумевает излучение монополярных гравитационных волн». Кутчера изучил два вида монополярных гравитационных волн: первый связан с прохождением мимо наблюдателя тонкого слоя гамма-квантов, вызванных вспышкой, после чего гравитационное притяжение падает до нуля (если первоначальный огненный шар состоял только из гамма-квантов), а второй вид монополярных волн вызван изменением давления в файрболе, из-за чего уменьшается его активная гравитационная масса (которую Кутчера назвал «массой Уиттекера»).

В приближении слабого поля Кутчера вычислил пространственно-временную метрику для такого облака, задав переменность его массы в виде параметрической функции. Он рассматривал новую метрику как шварцшильдовскую метрику с возмущением из-за переменности массы. Метрика Кутчеры совпадала с метрикой Шварцшильда для случая слабого поля, с тем отличием, что постоянная масса в метрике Шварцшильда заменилась на переменную гравитационную массу. Возможность антигравитации в такой метрике Кутчерой не рассматривалась. Космология с переменной гравитационной массой, о необходимости которой говорил Ф. Андерсон, тоже не строилась.

Кутчера рассматривал оба вида гравитационных монополярных волн как равноправные, но мы полагаем, что они принципиально различны. Назовем, для определенности, первый вид монополярных волн, связанный с прохождением сферического слоя излучения, вызванного какой-то вспышкой, «виртуальной монополярной волной» или «вспышечной монополярной волной». Второй вид волн назовем «реальной монополярной гравитационной волной» или «волной Уиттекера» - она будет связана с уменьшением удаленной гравитационной массы без какого-либо прохождения квантов или другой материи возле наблюдателя. Только реальные монополярные волны второго вида могут вызывать антигравитацию или гипергравитацию – именно они описываются новым (вторым) членом в формуле гравитационного ускорения (3), а виртуальные волны первого рода описываются первым членом в правой части (3). Очевидно, что, даже при уменьшении массы до нуля, этот член описывает только притяжение. Разницу между двумя

видами монополярных волн понять легко по следующему признаку. Реальные монополярные волны не привязаны к какому-либо веществу и распространяются всегда со скоростью света. Виртуальные волны всегда сопутствуют движению вещества или негравитационного излучения. Обратим внимание, что процесс уменьшения гравитационного притяжения до нуля происходит не только при прохождении возле наблюдателя оболочки из квантов излучения,двигающихся со скоростью света, но и при медленном движении оболочки из обычного вещества, например, газа. При этом, изменение массы внутри сферы, на поверхности которой находится наблюдатель, зависит от скорости прохождения оболочки и происходит без какого-либо запаздывания, так как наблюдатель находится в точке формального изменения массы, следовательно, изменение массы для него будет описываться более простой функцией $M(t)$, куда скорость света не входит. Тем самым, «виртуальная монополярная волна» не является релятивистской и вообще волной – она привязана к материи (или излучению), которая ее порождает, и движется вместе с ней. Антигравитации здесь не будет, как и при уменьшении притяжения до нуля при падении наблюдателя к центру Земли.

В остальной части книги под монополярными гравитационными волнами мы будем подразумевать только реальные волны или волны Уиттеккера.

10.2 Антигравитация и гипергравитация в ОТО

Цель нормальной науки ни в коей мере не требует предсказания новых видов явлений: явления, которые не вмещаются в эту коробку, часто, в сущности, вообще упускаются из виду. Ученые в русле нормальной науки не ставят себе цели создания новых теорий, обычно к тому же они нетерпимы и к созданию таких теорий другими.

Томас Кун «Структура научных революций» (1970)

В 2015 году Н. Горькавый и А. Васильков, не зная о малоизвестной работе М. Кутчеры (2003), приступили к построению новой космологии с переменной массой, в первую очередь, решив верифицировать в рамках ОТО квазиньютоновские формулы (2), (3), опубликованные тоже в 2003 году. Эту задачу удалось решить. Статья Горькавого и Василькова, опубликованная в 2016 году, была сфокусирована на изменении гравитационной массы системы из-за слияния черных дыр и перехода части их гравитационной массы в гравитационное излучение, которое не имеет гравмассы (см. Приложение I, где вопрос о гравитационной массе гравволн обсуждается подробно). Во время написания статьи, в начале 2016 года, обсерватория LIGO сообщила об открытии гравитационных волн, возникших при слиянии черных дыр с массами в 29 и 36 солнечных масс, в результате которого 5% массы первоначальных дыр перешло в гравизлучение, что составляет три массы Солнца. Открытие LIGO подтвердило актуальность изучения системы с переменной гравитационной массой.

Как известно, уравнение Эйнштейна для случая слабого поля превращается в волновое уравнение (см. формулу (4) в Приложении II), которое описывает, в частности, гравитационные волны, создаваемые парой черных дыр, вращающихся вокруг общего центра тяжести (см. иллюстрацию 12). Но это же уравнение, при изменении гравитационной массы источника поля, описывает распространение монополярной гравитационной волны, которая распространяется сферически симметрично вокруг источника излучения. Уже в процессе оформления статьи в журнал Королевского астрономического общества, Горькавый и Васильков обнаружили статью Кутчеры и сослались на нее. Для получения монополярной гравитационной волны Кутчера тоже использовал решение волнового уравнения, но не затронул возможность существования антигравитации в такой пространственно-временной метрике с переменной гравитационной массой (мы будем называть метрику, полученную Кутчерой в 2003 году, «метрикой Кутчеры»).

Решение уравнений Эйнштейна полностью подтвердило формулы (2)-(3), выведенные в квазиньютоновском приближении. Горькавый и Васильков показали, что при

уменьшении гравитационной точечной (или компактной) массы вокруг нее возникает зона антигравитации, которая зависит от радиуса довольно сложным образом (рис. 4). Если «разместить» на склонах этих кривых (см. рис.4) небольшие шарики, то они покажут, куда направлена гравитация на каждом участке кривых – к центру системы или от него. Как видно из рисунка 4, гравитационное притяжение, растущее при уменьшении радиуса быстрее, чем новый отталкивающий член, по-прежнему доминирует на малых расстояниях, а также остается квазиньютоновским притяжением на больших расстояниях, куда сигнал об изменении массы не успел добраться. Появление зоны антигравитации вокруг тела с уменьшающейся массой не связано с конкретным видом функции (2). Чтобы показать это, был проведен численный эксперимент, в котором масса тела просто последовательно уменьшалась на 5% в течение 10 шагов (рис. 5). Этот эксперимент подтвердил появление зоны антигравитации вокруг системы, переменность массы которой может описываться практически любой численной или аналитической функцией.

Некоторыми авторами делались попытки полностью компенсировать монополярную волну, возникающую из-за уменьшения массы тела вследствие гравитационного излучения. Для этого нетензорная энергия выпущенных гравитационных волн включалась в качестве источников гравитационного поля в правую часть уравнений Эйнштейна. Такой подход соответствует формулировке ОТО в версии 1915 года и противоречит позднейшей трактовке ОТО в версии 1919, которой придерживались сам Эйнштейн и другие ученые (см. Приложение I).

Различные трактовки теории могут вызывать острые споры среди ученых, но лучшим судьей всегда остается природа. Как показывается в данной книге, версия ОТО 1915 года приводит к невозможности понять в рамках общей теории относительности механизм Большого взрыва, а также к таким нефизическим решениям, как сжатие гравитирующих систем в точечную сингулярность. В то же время ОТО 1919 года легко решает эти и все остальные проблемы космологии, что лишает всякого смысла споры о том, какая трактовка правильнее.

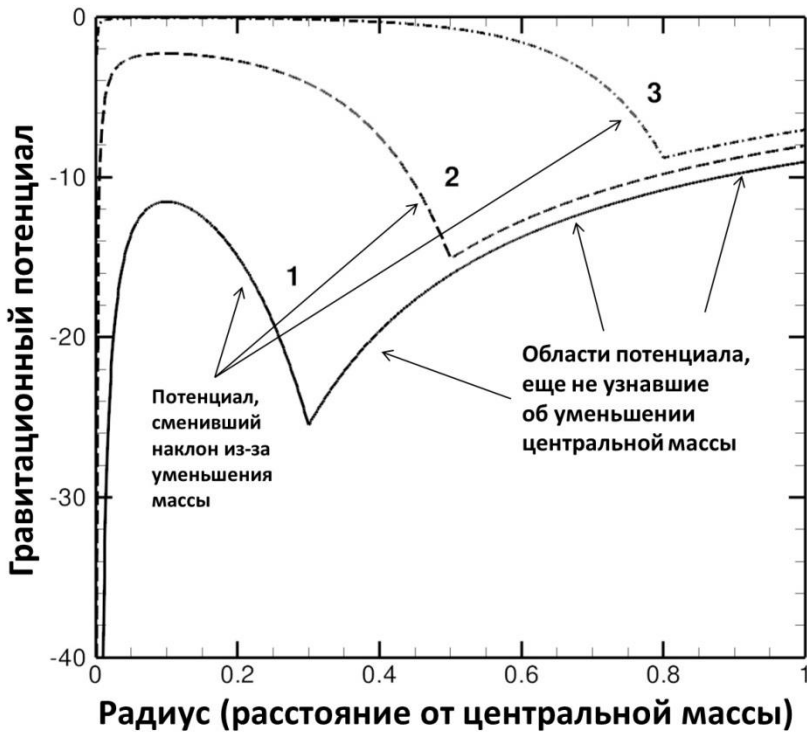


Рис. 4. Гравитационный потенциал (в $10^{-21} \text{ см}^2/\text{сек}^2$) как функция радиуса (в миллиардах световых лет) для экспоненциального уменьшения массы. Кривые 1,2,3 соответствуют времени от начала изменения массы системы в 0.3, 0.5, 0.8 млрд лет. Для лучшей визуализации кривая 2 смещена вниз от кривой 3 на единицу (аналогично, кривая 1 смещена относительно кривой 2).

В статье 2016 года, Горькавый и Васильков высказали надежду на построение циклической модели Вселенной, но не обсуждали, каким образом Вселенная из современного состояния расширения перейдет к сжатию. В статье был предсказан высокий уровень реликтового гравитационного излучения во Вселенной, потому что оно не имеет гравитационной массы и не подпадает под существующие наблюдательные ограничения. В статье отмечено также, что развиваемая модель Вселенной может объяснить наблюдаемую анизотропию движения галактик.

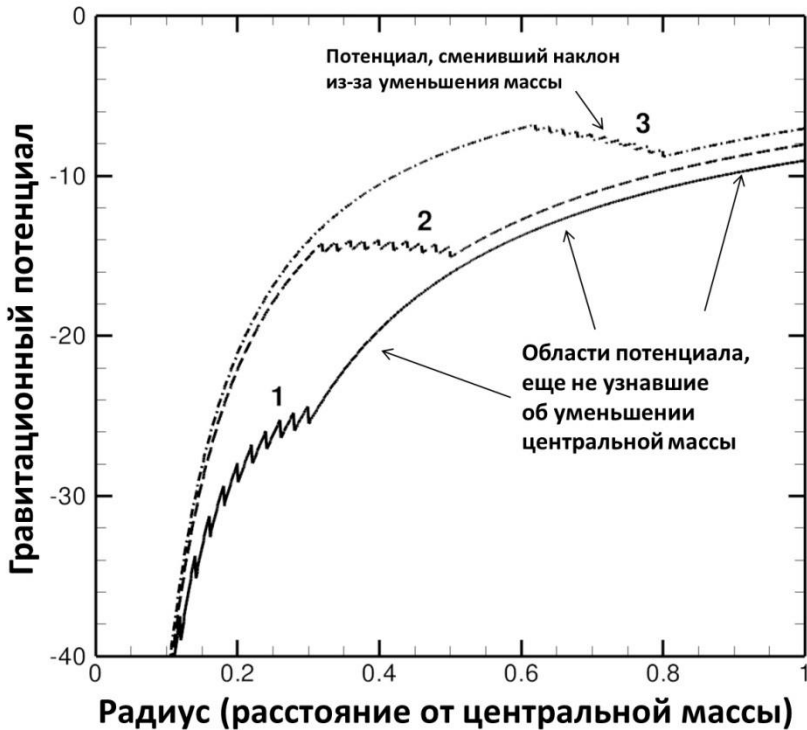


Рис.5. Аналогичен рис. 4, только уменьшение массы задается численно, десятью последовательными шагами по 5% массы в каждом. Очевидно, что при увеличении числа шагов (и соответствующем уменьшении их величины) зубчатые части кривых будут сглаживаться. Градиент участка кривой 3 показывает антигравитацию на участке между 0.6 и 0.8 миллиарда световых лет.

В статье Горькавого и Василькова (2016) было предположено, что рассматриваемая антигравитация решит и проблему сингулярности. Действительно, с точки зрения ОТО 1915 года, гравитационная масса коллапсирующей сферы не меняется, она лишь превращается из массы вещества в массу, вызванную энергией гравитационных волн. Поэтому гравитационный коллапс сферы с неизменной гравитационной массой остановить нельзя. Зато с точки зрения ОТО 1919 года, энергия гравитационных волн не может породить гравитационное поле, тем самым, гравитационная масса

коллапсирующей сферы будет уменьшаться по мере перехода в ходе коллапса энергии материи в псевдоэнергию граволн. Это ключевое различие общей теории относительности 1915 и ОТО 1919 года. Нужно отметить, что переменность гравитационной массы в замкнутом объеме не является оригинальной идеей. В теории гравитации Нордстрема 1912 года, которую Эйнштейн в свое время внимательно изучал, гравитационная масса тоже меняется, а в уравнения динамики входит производная массы по времени. Аналогичные предположения выдвигают и некоторые не-эйнштейновские теории гравитации. Если же учесть отсутствие гравитационной массы у гравитационного излучения, то переменность гравитационной массы становится неотъемлемым феноменом и классической теории Эйнштейна.

Напомним, что на стадии гравитационного коллапса все силы, противодействующие коллапсу (центробежная сила, давление электронного или нейтронного газа) становятся малы по отношению к гравитационной силе притяжения. Означает ли это неотвратимость гравитационного коллапса и сжатия системы в сингулярную точку? Нет, это означает лишь то, что гравитационный коллапс нужно победить с помощью самой гравитации, то есть с помощью таких гравитационных феноменов, которые растут при сжатии быстрее притяжения, что дает возможность его преодоления. И такие гравитационные феномены существуют: это гравитационное излучение и приливные силы.

Для решения проблемы сингулярности нужно показать, что гравитационное излучение при коллапсе всегда растет. Но если взять идеальную сферу и заставить ее сжиматься, то никаких гравитационных волн, согласно теореме Биркгофа, генерироваться не будет. Покажем нереальность предположения об идеальной коллапсирующей сфере. Рассмотрим поверхность коллапсирующей звезды, где сила гравитации растет как квадрат обратного радиуса r^{-2} . Такой гравитационный эффект, как приливная сила, зависит от обратного радиуса сильнее: в третьей степени r^{-3} . Что такое приливная сила? Поместим в гравитационное поле Земли объект размером s . Если записать разность гравитационной силы для разных (по радиусу) точек этого объекта, пропорциональную выражению $r^{-2} - (r + s)^{-2}$, то для малых $s \ll r$ получим формулу силы, зависящую от sr^{-3} .

Таким образом, приливная сила - это разность гравитационных сил для ненулевого по размерам объекта: если s стремится к нулю, то и приливная сила обнуляется.

Представим себе сжимающуюся сферическую звезду с жидкой поверхностью, по которой распространяются невысокие, почти незаметные волны. Можно взять не звезду, а газовое облако: любая космическая система обладает такими поверхностными волнами из-за флуктуаций. Если волны неустойчивы, то они начинают расти - и система переходит в новое состояние. Приливные силы растягивают по радиусу любые объекты с ненулевой радиальной протяженностью, в том числе и волны на поверхности звезды. Поэтому при коллапсе приливные силы будут увеличивать амплитуду волн на сжимающейся звезде, пока они не вырастут в своеобразные «штормовые валы» или «цунами». Эта нестабильность поверхности будет тем сильнее, чем меньше радиус сжимающейся системы, так как приливные силы растяжения растут с сокращением радиуса быстрее гравитационных сил притяжения. Приливная сила велика, потому что это тоже гравитационная сила, вернее разница притяжения, взятого в разных по радиусу точках.

Рост флуктуации плотности или асимметрии коллапсирующей системы (с точки зрения падающего, то есть сопутствующего наблюдателя) - хорошо известное явление. Дорошкевич, Зельдович, Новиков отмечают в статье 1965 года «Гравитационный коллапс несимметричных и вращающихся масс»: «В собственном времени звезда... может сжаться до огромных плотностей, возмущения станут колоссальными» (в сборнике «Альберт Эйнштейн и теория гравитации», 1979). Вот что пишет Хокинг о неоднородностях при коллапсе Вселенной, которые растут вплоть до образования локальных сингулярностей: «Можно предположить, что современному расширению предшествовала фаза сжатия, когда локальные неоднородности вырастали большими и возникали сингулярности» (цитируется по Мизнеру, Торну и Уилеру, 1977, т.3).

«Эффекты несферичности в сопутствующей системе отсчета отнюдь не затухают, а, напротив, должны нарастать при дальнейшем сжатии тела, и поэтому нет никаких оснований

ожидать, чтобы поле под горизонтом могло определяться лишь полными массой и моментом тела» (Ландау и Лифшиц «Теория поля», 1973). Нестабильность коллапса настолько нарастает, что коллапсирующая система становится формально колебательной возле точки сингулярности. «...Процесс эволюции модели в направлении к особой точке складывается из последовательных серий колебаний, в течение каждой из которых расстояния вдоль двух пространственных осей осциллируют, а вдоль третьей – монотонно убывают... Между любым конечным моментом мирового времени t и моментом $t = 0$ заключено бесконечное множество колебаний» (Ландау и Лифшиц). Под $t = 0$ понимается момент достижения сингулярности. Подобные колебания коллапсирующей системы должны генерировать мощные гравитационные волны. Это подкрепляет вывод о превращении коллапсирующего вещества в гравитационное излучение.

Бэнкс и Фишлер в статье «Черное сжатие» (T. Banks, W. Fischler, «Black Crunch», hep-th/0212113, 2002) описывают впечатляющую картину, как в процессе коллапса Вселенной из растущих нестабильных флуктуаций образуется газ из черных дыр, которые сливаются в процессе дальнейшего коллапса в одну черную дыру, внутри этой черной дыры вещество снова разбивается флуктуациями на более мелкие черные дыры и так далее.

Вот такая картина поведения неоднородностей при коллапсе звезды в черную дыру следует из детальных расчетов Р. Прайса (цитируется по Мизнеру, Торну и Уилеру, 1977, т.3):

1. «В распределении плотности звезды в момент, когда она начинает коллапсировать, имеется небольшой «комочек», нарушающий сферическую симметрию».
2. «В процессе коллапса комочек все больше и больше растет (неустойчивость коллапса относительно малых возмущений – явление, хорошо известное в ньютоновской теории...))».
3. «Растущий комочек излучает гравитационные волны».

Расчеты Р. Прайса для падающего наблюдателя показывают, что комки на поверхности звезды сохраняются, когда она погружается под гравитационный радиус, при этом звезда образует искаженный горизонт. Но такие возмущения

гравитационного поля не доходят до внешнего наблюдателя: для него поле образовавшейся черной дыры будет сферически симметричным.

Действительно, кроме приливных сил, еще одним гравитационным эффектом, быстро растущим с коллапсом, является генерация гравитационного излучения, которая зависит от пятой степени радиуса коллапсирующей несферической системы: r^{-5} . Таким образом, гравитационные приливные силы «заботятся» о том, чтобы любая система, коллапсирующая под действием сил притяжения, была принципиально несферической. В свою очередь, генерация гравитационного излучения эффективно переводит массу коллапсирующей несферической системы в невесомые гравитационные волны до тех пор, пока притяжение не будет побеждено антигравитацией, и система не перестанет сжиматься.

Можно подойти к проблеме с другой стороны, и попробовать найти процесс, который *запретит* генерацию гравитационных волн коллапсирующим веществом. Легко убедиться, что это невозможно. Не забудем, что гравитация безусловно доминирует на последних стадиях коллапса, поэтому остановить излучение гравитационных волн, или хотя бы рост неустойчивых колебаний, даже сложнее, чем остановить сам коллапс из-за сил притяжения – хотя бы потому, что приливные силы и генерация гравволн растут при приближении к сингулярной точке быстрее гравитационного притяжения.

Проведем мысленный эксперимент, в котором отключим антигравитацию, возникающей при гравитационном коллапсе, и запретим разлет системы (то есть, Большой взрыв для Вселенной). Если процесс энергетического истощения вещества (переход его в гравитационные волны) неостановим, то конец его может быть только один: вещество исчезает. Это можно назвать «гравитационной аннигиляцией». Таким образом, вещество (и порождаемое им стационарное гравитационное поле!) должно полностью превратиться в переменное во времени гравитационное поле или гравитационные волны. В результате такого гравитационного коллапса системы, мы получим плотное облако гравитационных волн. Если говорить о законе сохранения энергии, то можно взять псевдотензор энергии гравитационного поля и убедиться в колоссальной «псевдоэнергии», запасенной в

этом облаке гравитационных волн. По версии ОТО 1919 года гравитационное излучение не обладает активной гравитационной массой, тем самым мы избежали гравитационной сингулярности: в системе не осталось вещества, которое можно сжимать дальше, а также исчезла сила, которая сжимала бы вещество, даже если бы таковое осталось. Это касается не только точечных сингулярностей. Кольцевых сингулярностей во вращающихся черных дырах или еще каких-либо мыслимых сингулярностей тоже не существует по тем же причинам: из-за ускоренной генерации гравитационного излучения и нарастания антигравитации при сжатии вещества.

Суммируем результат наших размышлений: проблема сингулярности легко решается, если включить в анализ коллапсирующей системы два хорошо известных эффекта – нарастание неоднородности системы, вызванной гравитационными (приливными) силами, и генерацию гравитационного излучения, связанного с неоднородностью коллапсирующей системы. После этого, принимая положение эйнштейновской теории 1919 года о том, что гравитационное излучение не порождает дополнительного гравитационного поля, мы найдем, что гравитационная масса коллапсирующей системы стремится к нулю по мере нарастания мощности гравитационного излучения. То есть, коллапс не приводит ни к бесконечной плотности вещества, ни к бесконечной кривизне пространства. Проблема гравитационной сингулярности элегантно разрешается в рамках классической общей теории относительности.

Если при рассмотрении коллапса реальной Вселенной учесть, что при быстром исчезновении гравмассы коллапсирующего вещества образуется волна антигравитационного потенциала, то мы найдем причину Большого взрыва. Как легко показать (см. Приложение II), антигравитация при сжатии Вселенной преодолевает притяжение задолго до сингулярности. Она останавливает коллапс Вселенной при размерах в несколько световых лет. Такая мощная антигравитация делает Большой взрыв неизбежным: как нельзя удержать вещество от падения в черную дыру, так нельзя остановить и разлет вещества под действием отталкивающей

гравитации тогда, когда это вещество окажется вблизи центра черной дыры.

11. Природа Λ -члена и решение проблемы темной энергии

*Мы должны распознавать симптомы группового мышления и бороться с ними, и мы должны открыть двери широкому кругу независимых мыслителей, обязательно оставляя место для особых личностей, необходимых для совершения революции.
Ли Смолин (2006)*

Современное ускорение Вселенной, открытое в 1998 году, поставило перед космологами задачу даже более сложную, чем проблема Большого взрыва. Когда рассматриваются процессы, происходившие много миллиардов лет назад, в условиях сильно сжатой Вселенной, то всегда можно прибегнуть к предположению о таинственных, например, квантовых силах, которые тогда действовали, а потом перестали (чем и воспользовались создатели теории инфляции). Но все усложняется, когда речь идет о современном и хорошо изученном состоянии Вселенной, в которой вдруг потребовалось ввести загадочную силу, заставляющую галактики не просто убегать друг от друга по инерции, а бежать с небольшим ускорением. Чем обусловлена такая «антигравитация»? Она феноменологически (то есть формально, без прояснения причин) хорошо описывается Λ -членом, введенным еще Эйнштейном в 1917 году. Но в чем физическая причина этого космологического отталкивания? Так как автор данной книги связал себе руки обязательством не прибегать к введению новых неизвестных сущностей, то нужно снова обратиться к классической ОТО, конечно, в версии 1919 года.

11.1 Первое приближение: классические уравнения Фридмана и решение проблемы космологической постоянной

В структуре общей теории относительности нет ничего, что требовало бы однородности и изотропности Вселенной или ее наполнения материей. У нас нет никаких идей, почему Вселенная так устроена.
Р. Дикке

В статье 2016 года Горькавый и Васильков предположили, что современное ускорение расширения Вселенной тоже связано с переменностью гравитационной массы Вселенной. Аналогичное предположение высказал и нобелевский лауреат Филип Андерсон в 2018 году. При этом ожидалось, что современная антигравитация определяется уменьшением массы Вселенной, что затрудняло построение циклической модели Вселенной (как Вселенная перейдет к сжатию, если до сих пор идет процесс уменьшения ее массы?).

Горькавый и Васильков в 2016 году рассмотрели модифицированную метрику Шварцшильда. Такая метрика пространства-времени предполагает, что мы смотрим на мир глазами неподвижного глобального наблюдателя, «наблюдателя-бога». В то же время, реальное человечество живет в крохотной галактике, которая летит по просторам космоса. В миллиардах других галактик живут расы иных разумных существ – и каждая из них привязана к своей планете. Вселенная фактически наполнена локальными наблюдателями, свободно летящими по пространству. Их восприятие мира тоже локально: главным образом, они могут измерять скорость, с которой движутся относительно них галактики-соседи. Александр Фридман предложил особую метрику, которая описывает динамику изотропного и однородного мира свободных локальных наблюдателей. Из этой метрики и уравнений Эйнштейна он вывел знаменитые уравнения Фридмана, который лежат в основе всех современных космологических моделей. В эти уравнения сейчас включен и феноменологический Λ -член неизвестной природы, который был вставлен в исходные уравнения еще Эйнштейном. Только Эйнштейн пытался с его помощью создать

стационарную модель Вселенной, а сейчас Λ -член используют для описания ускоренного разбегания поля галактик.

В статье 2018 года Горькавый и Васильков получили модифицированные уравнения Фридмана, учитывающие переменность гравитационной массы. Влияние переменной массы рассматривалось как возмущающий фактор для космологической метрики Фридмана-Леметра-Робертсона-Уолкера. При этом исходные уравнения Эйнштейна записывались без гипотетического космологического Λ -члена. Расчеты показали, что, хотя в первоначальной метрике не предполагалось наличия космологической постоянной, в итоговых уравнениях появилась элегантная симметричная комбинация вторых пространственных производных от возмущающей функции (см. формулу (28) из Приложения II), которая описывает ускоренное расширение поля галактик, полностью соответствуя космологической постоянной. При этом обнаружилось, что наблюдаемое ускоренное расширение Вселенной связано не с антигравитацией, как предварительно ожидалось, а с гипергравитацией, то есть с ростом гравитационной массы Вселенной или, например, с увеличением массы самой большой черной дыры. Это открывало возможность построения циклической космологической модели, в которой рост массы черных дыр обеспечивает остановку и последующее сжатие Вселенной. Интересно, что де Ситтер еще в начале 20 века отмечал, что космологическая постоянная Λ может быть отрицательной и давать дополнительное космическое притяжение вместо космического отталкивания.

Ускоренное расширение поля галактик оказалось ускоренным растяжением, которое оказывают растущие черные дыры на поле галактик. Относительное взаимное ускорение расширения набора галактик происходит на фоне абсолютного торможения разлетающейся Вселенной. Как такое возможно? Снова обратимся к аналогу гравитационного поля в виде резиновой пленки. Разместим на склоне воронки колонну легких автомобильчиков, выбирающихся из потенциальной ямы по радиальной трассе. Что будет, если шар, растягивающий пленку, увеличивает свою массу? Тогда воронка будет углубляться, а цепь из автомобильчиков, которые являются аналогами галактик, - растягиваться. Если в колонне автомобилей на ночной дороге

задняя машина ускоренно отстает от передней, то это можно интерпретировать как относительное ускорение первой автомашины, но равноправна и другая интерпретация, что заднее авто чем-то тормозится, причем сильнее, чем передняя. Локальные наблюдатели не могут определить – связано ли растяжение колонны машин с ускорением первой машины, или с торможением последней. Но теоретик с правильными формулами эквивалентен абсолютному наблюдателю-богу и знает истину: поле наблюдаемых галактик растягивается со слабым относительным ускорением на потенциале тормозящейся Вселенной с растущей массой. Последующее углубление воронки рано или поздно остановит движение передней машины в колонне. Хотя расстояние между первой и последней машиной все еще будет увеличиваться с относительным ускорением, вся колонна уже будет двигаться к центру воронки, иллюстрируя коллапс Вселенной или Большое сжатие. Так гласит математическое решение уравнений Эйнштейна, опубликованное Горькавым и Васильковым в 2018 году. В первом приближении полученные модифицированные уравнения Фридмана полностью совпадают с его классическими уравнениями, только с той разницей, что космологическая постоянная в Λ -члене перестала быть феноменологической константой, а превратилась в физическую функцию, связанную с переменностью гравитационной массы Вселенной.

Совпадение модифицированных уравнений Фридмана в первом приближении с классическими уравнениями Фридмана означает, что теория Вселенной с переменной массой не противоречит всему объему наблюдательной информации, согласно которой наша Вселенная изотропна, а ее расширение подчиняется уравнениям Фридмана. Поэтому, когда спрашивают о наблюдательных доводах в пользу новой космологической модели, то ответ прост: все доводы в пользу обычной изотропной Λ CDM-космологии сохраняют свою силу и для космологии с переменной массой. Для краткости, назовем новую космологическую модель α CDM-космологией или AlphaCDM (АльфаСДМ) космологией – с учетом неньютоновского α -члена в уравнениях (2) и (3), описывающего антигравитацию и гипергравитацию.

Получение феноменологической космологической константы в виде физической функции - большой шаг вперед. Например, это позволяет оценить уровень фона реликтовых гравитационных волн, который определяет рост массы самой большой черной дыры. В статье Горькавого, Василькова и Мазера, которая вышла в сборнике международной конференции «Исследование темной стороны Вселенной» (состоявшейся в июне 2018 года на карибском острове Гваделупа, Франция), была получена первая оценка энергии этого фона (см. выражение (33) в Приложении II). Эта оценка дает плотность среды гравитационных волн, при поглощении которых самая большая и быстрорастущая черная дыра генерирует дополнительное гипергравитационное поле, вызывающее наблюдаемую космологическую постоянную. Плотность энергии, необходимая для питания этой огромной космологической машины, оказалась $\sim 10^{-(28-29)}$ г/см³, что примерно на порядок больше суммы барионного вещества и темной материи во Вселенной. Если принять эту оценку, то получится впечатляющая картина Вселенной, которая состоит по большей части из гравитационного излучения и лишь на меньшую часть - из черных дыр, барионов и фотонов с примесью других частиц.

Эта необычная картина Вселенной содержит только известные науке компоненты, свойства которых изучены достаточно хорошо. В отличие от квантовых космологов, мы не можем задавать физические свойства компонент Вселенной, чтобы обеспечить желаемую картину мира. Из модели можно оценить лишь величины этих составляющих нашего мира. Следовательно, дальнейшее изучение Λ CDM-модели и применение ее для объяснения других космологических феноменов, непременно выявит в модели непреодолимое противоречие, или, наоборот, подтвердит ее работоспособность.

11.2 Второе приближение: уравнения Фридмана с анизотропией и неоднородностью

Когда космологи исследовали крупномасштабные моды микроволнового фона, они обнаружили еще больше загадок. Космологи убеждены, что в самых больших масштабах

*Вселенная должна быть симметричной, то есть любое одно направление должно быть похоже на любое другое. Это не то, что мы видим. Излучение в этих крупномасштабных модах несимметрично; существует предпочтительное направление (космологи Кейт Лэнд и Жоао Магейхо назвали его «осью зла» [“Examination of Evidence for a Preferred Axis in the Cosmic Radiation Anisotropy”, Phys. Rev. Lett., 2005]). Ни у кого нет рационального объяснения этому эффекту.
Ли Смолин (2006)*

Мы воспринимаем локальную земную поверхность, по которой ходим и ездим, как плоскую поверхность (если мы только не находимся в горах или холмистой местности). Но глобально земная поверхность является поверхностью шара. Поэтому утверждения, что Вселенная локально (а наши наблюдения почти все локальны) является однородной и изотропной, не исключают того, что глобально она окажется неоднородной и анизотропной. Об этом говорят многие выдающиеся ученые. Например, Р. Толмен пишет в своей классической книге 1934 года: «...хотя мы и можем попытаться приписать свойства нашей ближайшей окрестности Вселенной в целом, однако законных оснований для этого нет. Вселенная в целом вовсе не обязана обладать теми же свойствами, что и видимая нами ее часть. Поэтому, хотя мы в дальнейшем будем постоянно пользоваться однородными моделями, тем не менее всегда нужно помнить, что это делается скорее для того, чтобы достаточно четко сформулировать задачу и преодолеть математические трудности, чем для того, чтобы добиться наибольшего сходства с реальностью». «Нужно все время иметь в виду, что гипотеза пространственной изотропии не обязательно должна согласовываться со всеми фактами в реальной Вселенной и что, даже если полученная с ее помощью модель окажется в состоянии объяснить некоторые космологические явления, все равно нужно быть всегда готовым внести в нее поправки, которые могут улучшить теорию или сделать ее применимой к более широкому кругу явлений».

Очевидно, что изотропия и однородность являются самыми простыми предположениями, с которых логично начинать построение теории Вселенной, но класс неоднородных и анизотропных космологических моделей тоже существует и развивается многими исследователями.

Обсуждаемая нами α CDM-модель в первом приближении приводит к однородной и изотропной Вселенной, но во втором приближении в ней появляются новые свойства. В следующем приближении модифицированные уравнения Фридмана приобретают члены, которые отсутствуют в классических космологических уравнениях. Новые уравнения отвечают модели, обладающей, во-первых, слабой анизотропией, а во-вторых – неоднородностью. Анизотропия определяется новым членом с производной по времени от гравитационного воздействия переменной массы, который появился в модифицированном уравнении Фридмана (см. \dot{b} и (27) в Приложении II). Величина нового члена составляет несколько процентов (см. (41) в Приложении II). Неоднородность обсуждаемой модели связана с тем, что влияние переменной массы зависит от расстояния до нее. Тем самым, чем ближе к переменной центральной массе находится система, тем больше она будет подвержена ее влиянию.

Измерение глобальной неоднородности и анизотропии Вселенной осложняется двумя факторами: во-первых, эффекты неоднородности нарастают с расстоянием (так кривизна Земли становится заметнее на больших масштабах), а на больших расстояниях наблюдения затруднительны. Во-вторых, в космологических наблюдениях существует очевидная дипольная анизотропия, связанная с движением Земли, например, сквозь фон реликтового излучения. Эта анизотропия локального движения, складываясь с потенциальной глобальной анизотропией, маскирует ее.

Мы рассмотрим многочисленные наблюдательные данные в пользу глобальной неоднородности и анизотропии Вселенной в следующей части. Как следует из этого анализа, серьезной проблемой для получения таких данных является предубежденность в том, что Вселенная является плоской, однородной и изотропной. Очень часто теоретический анализ

наблюдений базируется на таком априорном предположении и не дает возможности выйти за рамки этой упрощенной парадигмы.

12. Решение проблемы темной материи в циклической Вселенной

Можно было бы предположить, что Вселенная совершает осцилляции с вечно сменяющимися периодами расширения и сжатия... не исключается, что когда-нибудь мы, возможно, обнаружим остатки предыдущих циклов истории Вселенной. Однако в настоящее время подобные вопросы остаются космологическими фантазиями.
С. Вайнберг (1972)

12.1 Темная материя из черных дыр звездных масс

Двадцать шесть попыток предшествовали сотворению мира, и все они кончились неудачей. Мир человека возник из хаоса обломков, оставшихся от прежних потерь. Талмудические тексты о сотворении мира, цитируются по И. Пригожину и И. Стенгерс

Наблюдения показывают существование обширной популяции черных дыр, которую делят на три класса: аббревиатура SBH (Stellar-mass Black Hole) означает черные дыры звездных масс до 100 масс Солнца; IMBH (Intermediate-Mass Black Hole) – объекты промежуточной массы от 100 до 10^5 солнечных масс; SMBH (SuperMassive Black Hole) – сверхмассивные черные дыры в $10^5 - 10^{10} M_{\odot}$ (илл. 8-11).

В центрах галактиках расположены сверхмассивные черные дыры, а темная материя в гало галактик, возможно,

состоит из черных дыр звездных масс. Дыр промежуточной массы известно мало - их нашли лишь в некоторых центрах шаровых звездных скоплений. Попробуем совместить это обилие и разнообразие черных дыр с концепцией циклической Вселенной. С одной стороны, циклическая модель упрощает проблему формирования темной материи из черных дыр, образовавшихся при взрывах сверхновых: они могут накапливаться из цикла в цикл. С другой стороны, черные дыры – это неразрушаемые объекты, которые могут только расти, причем их рост ускоряется с их размером. Как остановить рост этого прожорливого семейства с абсолютным аппетитом?

Пулковский астроном Кирилл Масленников в августе 2021 года выпустил на научно-популярном канале QWERTY прекрасную передачу про циклическую модель Вселенной с темной материей из черных дыр. Среди двух тысяч комментариев к этой передаче типичными вопросами были такие:

«Если бы черные дыры накапливались, то они бы уже заполнили всю вселенную и сожрали всю временную материю».

«Даже если вселенная циклична, все равно рано или поздно в ней ничего не останется, черные дыры все поглотят, это печально :(»

«Очень интересная теория! Но разве количество черных дыр не будет постепенно накапливаться? И не перекоцует ли, рано или поздно, все вещество Вселенной в черные дыры?»

Действительно, как достичь стационарного распределения неразрушаемых черных дыр, которые только образуются, растут и сливаются? Эта задача выглядит абсолютно неразрешимой. Кажется очевидным, что черные дыры поглотят всю обычную материю и станут единственными обитателями Вселенной. Но природа – гениальный конструктор, которая смогла решить и эту «неразрешимую» задачу!

Предположим, что черные дыры образуются в результате взрывов сверхновых и переходят из цикла в цикл, накапливаясь вместе с гравитационными волнами, которые образуются при слиянии черных дыр. Можно показать (см. Приложение II), что даже если вся существующая темная материя образована черными дырами звездных масс, ее объем будет ничтожным по сравнению с объемом Вселенной, сжатой до размеров в

несколько световых лет. Вселенная даже в состоянии максимального коллапса может легко вместить все черные дыры мира – как звездных масс, так и гораздо более объемные сверхмассивные дыры из центров всех галактик (см. Приложение II). Итак, в циклической Вселенной суммарное число и масса черных дыр будут накапливаться. Для стационарности популяции нужно как-то убирать хотя бы часть черных дыр. Как это сделать?

Как мы уже отмечали, распространенное мнение о черных дырах как сверхплотных телах верно только для черных дыр звездных масс. Чем крупнее дыры, тем меньше их плотность. Их граница становится все «эфимернее» и все безопаснее для поглощаемых объектов. Если огромная черная дыра проглотит набор звезд, планет и мелких черных дыр, то они исчезнут из поля зрения внешнего наблюдателя, и информация о них будет навсегда недоступной для него. Но если встать на точку зрения наблюдателя, падающего в черную дыру, то никакой потери информации не происходит: при попадании в огромную черную дыру мы снова увидим попавшие туда ранее звезды, планеты и мелкие черные дыры. Граница крупной дыры перестает быть местом катастрофического разрушения («спагеттификации» и т.д.), а становится достаточно условным барьером, легко проницаемым в одну сторону. Это открывает дорогу к стационарности распределения черных дыр во Вселенной, потому что когда самая большая черная дыра мира разрастается до размеров самой Вселенной, то она «съедает» все галактики. Мы попадаем внутрь этой дыры и снова видим поглощенное ею вещество, а граница черной дыры уходит на периферию мира. То есть, мы фактически избавляемся от единственной, зато самой большой дыры в распределении – и это позволяет уравновесить рост популяции черных дыр. Рецепт избавления от «неуничтожимой» большой дыры заставляет вспомнить легенду о писателе Мопассане, который терпеть не мог Эйфелеву башню, но каждый день обедал в ресторане, расположенном в ней, - в единственном месте Парижа, откуда башня была не видна.

В статье Горькавого и Тюльбашева (2021) было показано, что стационарное распределение черных дыр, хорошо согласующееся с наблюдениями, достигается при предположении, что в каждом цикле теряется при слияниях 2-5%

количества текущей, то есть переходящей из цикла в цикл, популяции черных дыр одного возраста, а 95-98% дыр этой популяции переходят в следующий цикл. Под слиянием тут понимается поглощение мелких дыр сверхмассивными дырами, площадь которых доминирует в суммарной популяции. Модель следит в течение сотен циклов за этой популяцией, возникшей в нулевом цикле и двигающейся по времени (рис. 6).

В каждом космологическом цикле звездная эволюция будет порождать новые начальные популяции, поэтому мы будем иметь дело с непрерывным потоком черных дыр от цикла к циклу. В текущий момент времени, то есть, в настоящем цикле Вселенной, вокруг нас существует смесь черных дыр из разных циклов.

Аналогия из демографии: нашу планету населяют люди разных годов рождения, и общая численность популяции долгоживущих землян в десятки раз превосходит ежегодное количество новорожденных. Демография, например, изучает, как меняется со временем число людей определенного года рождения. Для страны с постоянным количеством и структурой населения, простым суммированием данных для популяции людей определенного года рождения можно вычислить общее количество населения и его распределение по возрастам. Стационарное распределение черных дыр обеспечивается рождением в каждом цикле множества небольших дыр при звездной эволюции и последующим исчезновением в конце цикла единственной, зато самой большой черной дыры. Здесь под концом космологического цикла мы подразумеваем не Большое сжатие, а поглощение поля галактик растущей большой черной дырой.

Огненная среда Вселенной, сжатой до нескольких световых лет, весьма отличается по составу от сегодняшнего разреженного состояния. Например, современная плотность барионного вещества на три порядка выше плотности реликтового электромагнитного излучения (в современной Вселенной в среднем имеется четыре атома водорода на кубический метр и 400-500 фотонов реликтового излучения на каждый кубический сантиметр). При сжатии в десять миллиардов раз плотность барионного вещества станет сравнимой с плотностью воды, зато плотность реликтового

излучения превысит несколько тонн на кубический сантиметр. Но эта гигантская плотность все равно очень мала по сравнению с плотностью черных дыр с массой около 10 масс Солнца, которая в сто миллионов раз выше, чем плотность излучения, сжатого в коллапсирующей Вселенной. Для сравнения – свинцовая пуля превосходит плотность воздуха, где она летит, всего в 10^4 раз.

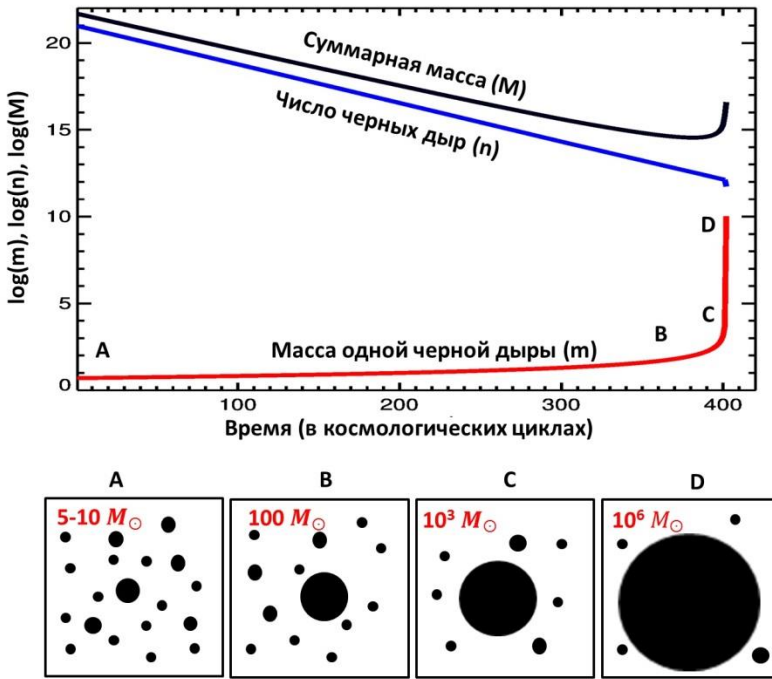


Рис. 6 Эволюция популяции черных дыр в Модели 1 (см. Приложение II) в течение 402 циклов. Индивидуальная масса черных дыр m показана нижней кривой, их количество n в каждом цикле – средней линией. Суммарная масса M популяции черных дыр каждого цикла отражена на верхнем графике. Все массы указаны в массах Солнца M_{\odot} . Внизу приведены качественные картины распределения черных дыр по размерам (масштаб условный), соответствующие этапам A, B, C, D на верхнем графике.

Маленький размер (в десятки километров) черных дыр звездных масс затрудняет их рост даже в очень плотной среде.

Плазма, которая устремляется в такую крохотную черную дыру, дополнительно разогревается и давление возникшего излучения вызывает остановку аккреции. В астрофизике такую остановку аккреции первый изучил Эддингтон («предел Эддингтона»). Важную роль в этом должны играть барионы, потому что именно они делают плазму сжатой Вселенной непрозрачной, что не дает фотонному газу возможности свободно двигаться к черной дыре. Расчеты показывают (см. Приложение II), что черные дыры звездных масс, побывав в среде сжатой Вселенной, поглощают сравнительно небольшую массу вещества из окружающей среды. Поэтому черные дыры, образовавшиеся при взрыве сверхновых, очень медленно увеличивают свою массу при переходе из цикла в цикл, и уменьшают численность лишь при поглощениях другими черными дырами (рис. 6). Именно из таких дыр звездных масс и накапливается львиная доля темной материи Вселенной.

Текущая популяция черных дыр, образовавшаяся в одном из космологических циклов, будет с каждым циклом сокращать свою численность (не из-за уничтожения дыр, а из-за их поглощения более крупными дырами), увеличивая среднюю массу черных дыр из-за аккреции. Так как рост массы черной дыры затруднен, систематическое падение их численности будет уменьшать суммарную массу популяции черных дыр. И только когда индивидуальная масса черных дыр будет близка к ста солнечным массам, прирост текущей массы популяции станет положительным и быстрорастущим – за счет быстрого аккреционного роста самых крупных дыр. Возникают черные дыры промежуточной массы, численность (и суммарная масса) которых мала по сравнению с черными дырами звездных масс. Зато дыры промежуточной массы, занимающие диапазон от ста масс Солнца до ста тысяч, служат затравками для возникновения сверхмассивных дыр в миллионы и миллиарды солнечных масс. Эти сверхмассивные дыры играют очень важную роль в дизайне нашей Вселенной.

В главе 18 мы обсудим наблюдательные следствия из данной модели темной материи.

12.2 Сверхмассивные черные дыры и Большая Черная Дыра

Теория относительности открывает новую возможность протекания необратимых процессов, которые продолжаются бесконечно.
Р. Толмен (1934)

Мы видели, что существует сила космического отталкивания, возрастающая по мере увеличения расстояния от нас. На наибольшем еще исследованном расстоянии она все еще увеличивается. Предыдущая теория объясняет, как это происходит. Но у нас есть еще желание понять, как она останавливается.
А. С. Эддингтон «Расширяющаяся Вселенная» (1933)

Если 2-5% текущей популяции черных дыр сливаются при Большом Сжатии, то можно ожидать, что 0.1-1% массы Вселенной при каждом коллапсе будет превращаться в гравитационные волны, то есть гравитационная масса Вселенной будет уменьшаться на эту величину. Если обратиться в формуле (4), то можно оценить, что при $M/M_* \sim 0.01 - 0.001$ шар сжатой Вселенной испытает антигравитационное расширение, если время уменьшения массы шара размером в несколько световых лет будет достаточно быстрым и составит от нескольких дней до месяца.

Можно лишь строить гипотезы о процессах, происходящих в максимально сжатой Вселенной. Частота слияния черных дыр в разных участках сжимающегося шара будет зависеть не только от размера коллапсирующей Вселенной, но и от степени ее однородности. Можно предположить, что в центре такого шара, который сколлапсировал из достаточно однородной Вселенной, будет самая высокая плотность. Следовательно, там массовое слияние черных дыр и условие антигравитации (4) может наступить

раньше всего. После чего эта волна антигравитации будет распространяться наружу, навстречу коллапсирующему веществу, сжимая его и вызывая повышенное слияние черных дыр и наступление антигравитации в новых областях. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока вся масса сжимающейся Вселенной не повернет назад: Большое сжатие превратится в Большой взрыв.

Параметры черных дыр, собравшихся в шаре сжатой Вселенной, весьма различны. Решения, приведенные в статье Горькавого и Тюльбашева (2021) (см. рис. 6 и также Приложение II), показывают, что сверхмассивные дыры – это продукт последнего цикла. Согласно модели, которая охватывает 402 цикла Вселенной (см. рис. 6), чтобы увеличить начальный вес СВН в 20 раз — от $5M_{\odot}$ до $100M_{\odot}$ - потребовался 381 цикл, в то время как на дальнейшее увеличение массы дыры в тысячу раз - от 100 до $10^5 M_{\odot}$ и на формирование популяции ИМВН, потребовалось всего 20 циклов. Образование популяции сверхмассивных черных дыр, растущих от $10^5 M_{\odot}$ до $10^{10} M_{\odot}$, происходит в течение последнего, 402-го цикла, потому что крупные черные дыры эффективно поглощают окружающую среду и очень быстро растут. Отметим, что плотность черной дыры с массой, приближающейся к 10^5 солнечных масс, становится сравнима с плотностью электромагнитного излучения в сжатой Вселенной. Это размывает границу между сверхмассивными черными дырами и окружающей средой. Любой объем такой среды размером около миллиона километров может быть назван сверхмассивной черной дырой. При дальнейшем сжатии Вселенной, среда из электромагнитного излучения будет еще плотнее, что приведет к тому, что сверхмассивные черные дыры из центров нынешних галактик должны стать зонами пониженной плотности в такой среде, которая будет приближаться по плотности к черным дырам промежуточной массы (ИМВН). Коллапсирующая система, состоящая из смеси плотного излучения и черных дыр различной массы, требует детального анализа, потому что в ней усложняется, как само понятие «черная дыра», так и процессы аккреционного роста сверхмассивных дыр, их слияния и сопутствующей генерации гравитационного излучения. Логично предположить, что Вселенная испытывает всплеск

гравитационного излучения и начинает расширяться как раз при достижении размера в несколько световых лет, когда ее плотность сближается с плотностью сверхмассивных черных дыр. Эти дыры, которые определяют основной объем (но не массу) популяции черных дыр, играют ключевую роль в динамике Вселенной, потому что именно их слияние может создать Большую Черную Дыру (БЧД). Возможно, самой большой черной дырой на стадии расширения Вселенной становится просто самая большая сверхмассивная дыра, сохранившаяся с этапа сжатия.

В центре сжимающейся Вселенной возникает волна антигравитации, которая разбрасывает вокруг основную часть вещества и черных дыр, включая сверхмассивные, не успевшие слиться друг с другом. Расширение этого огненного шара, в котором плавают многочисленные холодные черные дыры, и является Большим взрывом. Сверхмассивные дыры, которые не слились в Большую Черную Дыру, сыграют особенную роль во Вселенной, потому что именно они станут затравкой для образования галактик, включая нашу Галактику Млечный Путь.

Большая Черная Дыра – это главная шестеренка механизма, который останавливает расширение Вселенной и заставляет ее сжиматься. Напомним, что гравитационные волны обладают псевдоэнергией, которая не гравитирует сама, но может переноситься с гравитационной волной – потому что эта псевдоэнергия является, фактически, характеристикой искривленного пространства-времени в волне. Но если волна налетает на детектор и превращает часть своей псевдоэнергии в реальную энергию детектора (например, в нагрев стержня, по которому ездят бусинки под действием гравитационной волны), то гравитационная масса детектора вырастает.

Черная дыра обладает очень ограниченным набором характеристик, в первую очередь, массой. В каком-то смысле, именно поэтому она является идеальным детектором гравитационных волн, со 100%-ой эффективностью переводя всю псевдоэнергию гравволн в реальную энергию, вернее, в массу черной дыры. Здесь опять надо вспомнить о двух различных точках зрения – покоящегося и падающего наблюдателя. Рассмотрим черную дыру, на которую падает наблюдатель вместе с облаком гравитационных волн. С точки

зрения внешнего покоящегося наблюдателя, облако гравитационных волн сожмется возле самой черной дыры в тонкий «блин», который прирастет к дыре и увеличит ее радиус, то есть массу. Падающий наблюдатель при этом будет проглочен растущей поверхностью черной дыры.

С точки зрения падающего наблюдателя, он сам и сопровождающее его облако гравитационных волн без помех проникнут внутрь черной дыры. Когда наблюдатель, попавший внутрь, попробует определить радиус черной дыры, в которую он влетел, то обнаружит, что этот радиус увеличился из-за количества псевдоэнергии, которую внесло в дыру облако гравитационных волн. То есть, это облако не будет генерировать локального гравитационного поля, но будет влиять на радиус внешней черной дыры. Это своеобразное проявление феномена «нелокализемости» гравитационной псевдоэнергии, когда она действует интегрально, но не дифференциально (это отмечал еще А. Эйнштейн в 1918 году – см. Приложение I). В данном случае, этот феномен обусловлен тем, что гравитационная волна взаимодействует с уже существующей черной дырой, возникшей из обычной материи, потому что из одного гравитационного излучения черную дыру создать, видимо, нельзя.

Таким образом, Большая Черная Дыра растет, поглощая как обычное вещество, так и гравитационные волны, а для жителей этой дыры плотность гравитирующей среды внутри дыры зависит только от обычного вещества (хотя радиус внешней дыры учитывает наличие гравитационных волн). Когда Большая Дыра дорастет до нашей Галактики, она проглотит ее без колебаний, но это никак не скажется на нашей обычной жизни, разве что астрономы будут после этого поглощения изучать не красное смещение далеких галактик, а синее.

Как мы увидим из следующего параграфа, Большая Черная Дыра не только задает динамику осциллирующей Вселенной, она играет ключевую роль и в решении проблемы роста энтропии. Такая экономичность решений – типичная изобретательность Природы.

13. Проблема энтропии в циклической Вселенной

В последней главе мы займемся космологией. Основой для наших

*исследований послужат
релятивистская механика и
термодинамика. Здесь мы
вступаем на увлекательный путь,
на котором нас ждут опасные, но
интересные проблемы.
Р. Толмен (1934)*

13.1 Энтропия Вселенной

*Мир горит, как огромная печь;
энергия, хотя она и сохраняется,
непрерывно рассеивается.
И. Пригожин и И. Стенгерс,
«Порядок из хаоса» (1986)*

Энтропию можно назвать характеристикой «мертвой энергии». Энергия низкоэнтропийной системы является «живой силой», которая может преобразовывать систему и вызывать в ней новые структуры. Например, перепад температур в атмосфере вызывает ветер, который в свою очередь порождает волновую структуру на поверхности океана (рис.7). Если температура в замкнутой системе выровняется, то ее суммарная энергия не изменится, но эта энергия станет бесплодной, «мертвой». Именно для ее характеристики и служит энтропия, которая становится максимальной для замкнутой системы с одинаковой температурой. Термин «мертвая» энергия не просто художественный образ, недаром Клаузиус пророчил остывающей Вселенной «тепловую смерть».

В классической термодинамике, не учитывающей гравитацию и подчиняющейся закону сохранения энергии, тепловая смерть замкнутой Вселенной неизбежна. Для анализа космологических моделей Ричарду Толмену в 1934 году пришлось отклониться от классической термодинамической модели Клаузиуса, потому что гравитирующие системы ведут себя по-особенному. Например, если рассмотреть поведение газа в комнате при отсутствии любых внешних источников (или стоков) энергии, то через некоторое время температура газа в различных частях комнаты сравняется.

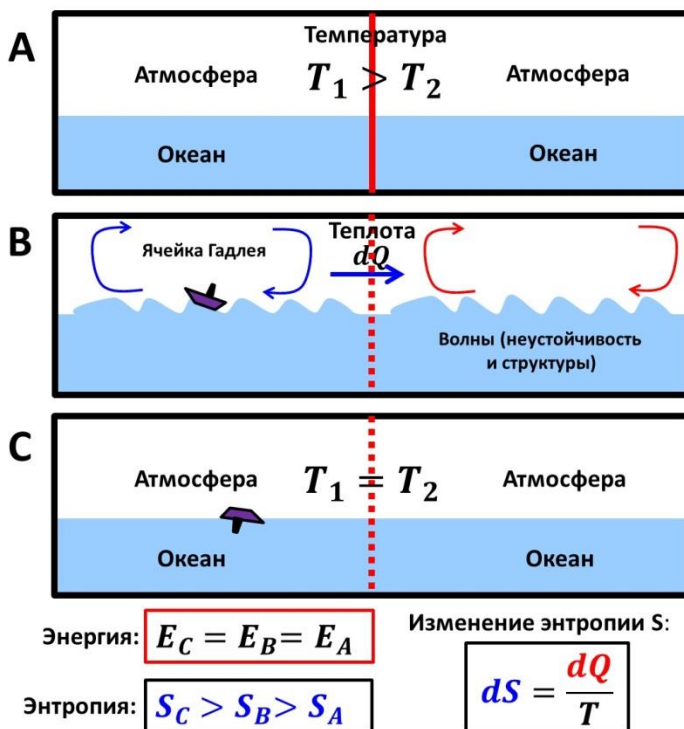


Рис. 7 Взаимоотношение энтропии, энергии и самоорганизации системы. Стадия А: изолированная модельная система из океана и атмосферы разделена непроницаемой перегородкой на две части. Температура левой части выше, чем у правой: $T_1 > T_2$. Каждая из частей находится в тепловом равновесии, поэтому в них нет ветра и на океане штиль; стадия В – перегородка стала проводить тепло, отчего из левой части в правую устремилось тепло dQ . В результате энтропия левой части стала уменьшаться, а правой – расти (см. формулу для изменения энтропии внизу рисунка). За счет меньшей температуры правой части, суммарная энтропия всей системы растет. Атмосфера в правой части нагревается возле перегородки, а в левой – остывает. Это вызывает атмосферную циркуляцию типа ячеек Гадлея, ветер и волны на поверхности океана; стадия С – температура левой и правой части выровнялись, суммарная энтропия стала максимальной и самоорганизация в системе прекратилась. Хотя энергия в состоянии С остается такой же, как и в стадиях А и В, она стала «мертвой».

Если же взять самогравитирующий газ, например, в объеме Солнечной системы, то система отказывается покорно двигаться к состоянию «тепловой смерти» и равномерного распределения температуры, и может образовать сжимающуюся и саморазогревающуюся газовую структуру – протозвезду.

Тем самым, гравитирующие системы ведут себя необычно, будто для них не выполняется второй закон термодинамики или закон сохранения энергии. Толмен связывает это с «общеизвестным нарушением закона сохранения энергии в релятивистской теории, если не введена потенциальная гравитационная энергия...». Введя псевдотензор энергии гравитационного поля, Толмен и ряд других ученых считают, что в гравитирующих системах закон сохранения энергии спасен, хотя бы в нековариантном виде. С их точки зрения, законы сохранения в негравитирующих и гравитирующих системах ничем принципиально не отличаются.

Но мы видим, что с точки зрения способности к самоорганизации, замкнутые гравитирующие и негравитирующие системы ведут себя так, как будто закон сохранения в первых не выполняется, в отличие от вторых. Природа не согласна с учеными, которые считают гравитационную энергию аналогичной обычной энергии - с точки зрения закона сохранения.

Гравитационная самоорганизация приводит к образованию галактик, звезд и созданию приемлемых для биологической жизни условий возле этих звезд (иллюстрация 16). Необычность энергетических характеристик гравитационного поля является важнейшим физическим фактором для существования жизни во Вселенной. Итак, природа солидарна с Эйнштейном и Эддингтоном: отрицает реальный характер потенциальной энергии гравитационного поля и не признает попытки спасения закона сохранения с помощью псевдотензора гравитационной энергии. Отказ от физической реальности локальной гравитационной энергии лишает всякого смысла попытки преодоления нетензорности ее описания, а также рассмотрения ее в качестве дополнительного источника гравитационного поля. После признания условности локальной гравитационной псевдоэнергии (Эддингтон считал ее «математической фикцией»), общая теория относительности в

своей версии 1919 года становится абсолютно стройной, элегантной и непротиворечивой теорией.

По классическим представлениям, основная энтропия Вселенной содержится в барионах, фотонах и нейтрино. Как показывают оценки (см. Приложение II), энтропия фотонов и нейтрино на 8 порядков превышает энтропию барионной составляющей нашего мира. Когда Ричард Толмен в 30-х годах прошлого века поднял проблему роста энтропии в моделях циклической Вселенной, то о термодинамике черных дыр ничего не было известно. Черные дыры долго рассматривались, как редкая и экзотичная компонента нашей Вселенной. Общепринятым был взгляд на черные дыры, как на неизлучающие объекты. Но Стивен Хокинг опубликовал в 1974 году в Nature статью с названием «Взрывы черных дыр?», где сделал следующее заключение: «любая черная дыра будет создавать и излучать частицы, такие как нейтрино или фотоны, с той скоростью, которую можно было бы ожидать, если бы черная дыра была телом с температурой... $\approx 10^{-6} (M_{\odot}/M) \text{ К}$... Поскольку черная дыра испускает это тепловое излучение, можно ожидать, что она потеряет массу. Это, в свою очередь, увеличило бы поверхностную гравитацию и, таким образом, увеличило бы скорость излучения. Следовательно, у черной дыры будет конечный срок жизни порядка $10^{71} (M_{\odot}/M)^{-3} \text{ с}$ ».

Бекенштейн и Хокинг в 1973-1975 годах ввели понятие энтропии черных дыр, которая пропорциональна их площади и тесно связана с понятием температуры черной дыры и феноменом ее излучения. Энтропия, как и площадь черных дыр, может только расти (для ЧД звездных и более масс можно не учитывать медленное испарение Хокинга на космологических временах). Необходимость введения энтропии черных дыр следует из второго закона термодинамики, согласно которому энтропия системы не может уменьшаться. Но черная дыра, проглатывая вещество, делает энтропию этого вещества невидимой для внешнего наблюдателя. Чтобы выполнить требования второго закона термодинамики, нужно чтобы черная дыра «забирала» себе энтропию поглощаемого вещества.

Таким образом, термодинамика стала рассматривать черные дыры звездных масс как экстремально холодные и медленно излучающие объекты с огромной энтропией.

Современные оценки (см. Приложение II и Таб. II) показывают, что энтропия, которая содержится в черных дырах звездной массы, на 8 порядков превосходит энтропию фотонно-нейтринной компоненты Вселенной.

Энтропия сверхмассивных дыр еще больше – она превосходит энтропию газа из фотонов и нейтрино на 15 порядков. Если же оценить энтропию Большой Черной Дыры, которая в максимуме сравнима с космическим горизонтом событий, то окажется, что она содержит львиную долю энтропии Вселенной, превосходя энтропию барионно-фотонной компоненты на 30 с лишним порядков, а энтропию всех черных дыр меньшей массы – почти на 20 порядков (см. Приложение II). Поэтому, при обсуждении проблемы энтропии циклической Вселенной нужно, в первую очередь, рассматривать энтропию Большой Черной Дыры. Проблема энтропии тесно связана с судьбой этой дыры, которая рассматривалась в разделе 12.2.

Таблица II. Энтропия основных компонент Вселенной *).

	$Ent_1 [k]$	$Ent_2 [k]$
Звезды	$9.5 * 10^{80}$	$3.5 * 10^{78}$
Межзвездная среда и межгалактический газ	$7.1 * 10^{81}$	$2.7 * 10^{80}$
Реликтовые нейтрино	$5.2 * 10^{89}$	$1.9 * 10^{88}$
Фотоны	$5.4 * 10^{89}$	$2.0 * 10^{88}$
Черные дыры (2.5-5 M_{\odot})	$5.9 * 10^{97}$	$2.2 * 10^{96}$
Сверхмассивные черные дыры	$3.1 * 10^{104}$	$1.2 * 10^{103}$
Космический горизонт событий	-	$2.6 * 10^{122}$

*) Данные воспроизводятся с разрешения авторов (Egan & Lineweaver, 2010) и Американского астрономического общества. Два вида энтропии, указанные в таблице II, соответствуют разным моделям расчета (Egan & Lineweaver, 2010).

Легко убедиться, что решение, найденное нами для стационарности популяции черных дыр, то есть, проникновение всех наблюдателей внутрь Большой Черной Дыры, является и решением проблемы энтропии. Здесь снова нужно рассмотреть точки зрения двух наблюдателей: внешнего и внутреннего.

Излучение, температура и энтропия черной дыры определены только для внешнего наблюдателя. С точки зрения внутреннего наблюдателя, у черной дыры нет излучения и энтропии. Следовательно, попав внутрь черной дыры, мы сбрасываем примерно двадцать порядков энтропии и начинаем новый цикл с низкоэнтропийного состояния. Это уменьшение энтропии для видимой части Вселенной, поглощенной черной дырой, не является формальным математическим трюком: очевидна разница между расширяющейся, остывающей и постепенно замедляющейся Вселенной с высоким уровнем энтропии (Вселенная внешних наблюдателей), и сжимающейся с ускорением и нагревающейся Вселенной с низкой энтропией (Вселенной внутренних наблюдателей). В настоящее время мы находимся в статусе внешних, по отношению к БЧД, наблюдателей, но, рано или поздно, перейдем в статус внутренних наблюдателей. Интересно, что в момент этого перехода время на нашей Земле (и в Галактике) резко замедлится с точки зрения внешних наблюдателей. С нашей же точки зрения, время будет течь как обычно, и весь процесс перехода внутрь черной дыры будет достаточно быстрым. Но по часам тех, кто наблюдает из безопасной галилеевской дали, поглощение Млечного Пути Большой Черной Дырой займет примерно сто тысяч лет, и то лишь благодаря тому, что поверхность Дыры быстро движется, иначе мы могли бы вообще навсегда застыть на ее границе (по часам внешних наблюдателей, конечно).

С термодинамической точки зрения, новый цикл Вселенной начинается не с Большого взрыва, а именно с этой точки перехода внутрь Большой Черной Дыры, с момента резкого сброса энтропии, которая отмечает кардинальную смену динамики Вселенной. Видимо, эта точка является точкой минимума энтропии в космологическом цикле, потому что при фазе сжатия Вселенной рост сверхмассивных черных дыр будет продолжаться, что приведет к увеличению суммарной энтропии Вселенной при ее коллапсе (рис.8).

Интересен вопрос об энтропии, которые несут с собой гравитационные волны. Если они увеличивают массу и площадь черной дыры, то увеличивают и энтропию черной дыры, значит, гравитационное излучение тоже обладает энтропией. Представляется логичным ввести понятие «гравитационной

энтропии» или «псевдоэнтропии», которая содержится в гравитационном излучении (которое не разбивается на гравитоны, как бы этого не хотелось квантовым гравитационистам). Полагаем, что свойства «гравитационной энтропии» схожи с характеристиками «гравитационной энергии»: эта псевдоэнтропия превращается в реальную, только после взаимодействия гравволны с черной дырой или детектором волн – при тех же условиях, при которых псевдоэнергия гравизлучения превращается в реальную.

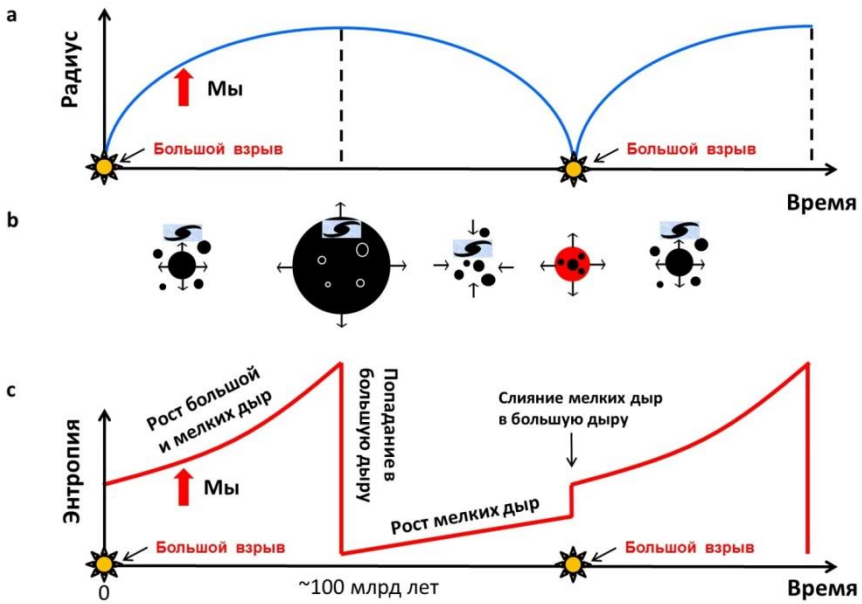


Рис. 8 Циклическая эволюция: радиуса пульсирующей Вселенной (а), галактик и размера Большой Черной Дыры (b) и энтропии наблюдаемой части Вселенной (с). В качестве начала цикла берется не Большой взрыв, а поглощение поля галактик растущей Большой Черной Дырой, из-за чего энтропия наблюдаемой Вселенной падает на много порядков. Черные дыры, растущие в сжимающейся Вселенной, увеличивают энтропию мира. При максимальном сжатии (перед моментом Большого взрыва) энтропия растет скачком из-за образования начальной большой дыры. Рост черных дыр, включая большую дыру, в расширяющейся Вселенной снова увеличивает глобальную энтропию.

Если псевдоэнтропия гравитационного излучения будет учитываться в балансе реальной энтропии после прохождения границы Большой Черной Дыры, то не будет достигнут минимум энтропии после этого перехода. И наоборот – без учета гравитационной энтропии и гравитационной энергии гравизлучения внутри Большой Черной Дыры, что мы полагаем правильным, Вселенная в черной дыре в начальный момент будет иметь минимальную энтропию (как и гравитирующую плотность среды меньше, чем полагается для дыры данного размера, потому что локальная гравитационная плотность гравизлучения равна нулю).

В каждом цикле Вселенной возникает Большая Черная Дыра, которая потом уходит на периферию, унося с собой весь груз энтропии, накопленный в данном цикле, и превращаясь во внешнюю максимальную дыру, которую мы называем Мегадырой. Она стационарна и может иметь размер в триллион световых лет, что заметно отличает ее от растущей Большой Черной Дыры, которая имеет начальный размер порядка светового года. Можно представить два варианта эволюции энтропии Вселенной:

1. Она растет с каждым циклом, что проявляется в медленном росте Мегадыры. Если предположить, что в каждом цикле накапливается энтропии на уровне 10^{90} (энтропия фотонно-нейтринно-барионной составляющей) или 10^{104} (суммарная энтропия черных дыр, за исключением БЧД) – см. Приложение II, то Мегадыра с энтропией 10^{122} будет увеличивать свой радиус за каждый цикл на 10^{-18} или 10^{-32} часть радиуса. Это составляет (при радиусе Мегадыры в триллион световых лет) в первом случае около 30 световых секунд или 10 млн км, а во втором 0.1 миллиметра. Характерное время изменения параметров такой квазициклической системы составит 10^{20-30} циклов, что практически не отличается от идеальной циклической системы.
2. Если закон сохранения энергии в рамках всей Вселенной выполняется, то масса и радиус Вселенной (то есть радиус Мегадыры) меняться не должны. Следовательно, энтропия не растет, а только

циклически меняется. Уход энтропии на периферию мира исключает ее из наблюдаемых параметров Вселенной, тем самым гипотетическое накопление энтропии где-то за горизонтом событий для нас не играет никакой роли. В этом смысле, замкнутая Вселенная предстает как идеальная термодинамическая система, которая работает бесконечно, благодаря таким абсолютно непроницаемым (изнутри) мембранам, как поверхность черной дыры. Эта термодинамическая идеальная цикличность не исключает того, что внутренность Мегадыры (то есть состав Вселенной) может меняться от цикла к циклу, стремясь, например, к стационарному, устойчивому балансу между различными компонентами мира.

Мы склоняемся к тому, что более реален второй вариант энтропийной эволюции Вселенной. Таким образом, Большая Черная Дыра – не только важный динамический механизм циклической модели, но и идеальный энтропийный маятник Вселенной.

13.2 Циклический баланс основных компонент Вселенной

*Сегодня принято считать, что современное расширение – это один из многих циклов, через которые проходит закрытая вселенная.
Дж. Силк (1980)*

Дж. Силк в своей книге «Большой взрыв» (1980) предполагал, что Вселенная могла испытать около сотни циклов. Мы полагаем, что число космологических циклов гораздо больше - как минимум, много сотен, иначе нельзя достичь наблюдаемого распределения черных дыр и других компонент Вселенной (см. Приложение II).

Приверженцы одноразовой модели Вселенной могут придумать механизм создания темной материи любой природы –

и на этом успокоиться. Перед сторонниками циклической космологии стоит гораздо более сложная задача: все компоненты осциллирующей Вселенной, включая темную материю, должны существовать в условиях изменения размеров мира на 10-11 порядков. Эти компоненты (и темная материя) не должны нарастать или уменьшаться от цикла к циклу – они в среднем должны быть стационарными. Под космологической стационарностью мы будем понимать приблизительное сохранение компонент Вселенной от цикла к циклу: например, в момент максимального сжатия, состав и состояние Вселенной в разных циклах будет практически одинаковым. Внутри цикла все составляющие Вселенной безусловно меняются в определенных пределах, взаимодействуя или перетекая друг в друга (Рис. 8). Рассмотрим циклические преобразования материи в осциллирующей Вселенной.

1. Барионно-фотонный цикл

Этот красивый цикл атомов, барионов и фотонов, который реализуется в циклической Вселенной, был найден в середине XX века. Он был первым открытым космологическим циклом, который одновременно является самым важным для нас – живых существ, состоящих из атомов. В настоящий момент этого цикла, в результате термоядерных реакций в звездном водороде, во Вселенной образуются и накапливаются атомы достаточно тяжелых элементов, например, углерода и кислорода, кремния и железа. Одновременно во Вселенной существует холодный фон из квантов электромагнитного реликтового излучения с температурой около 3 кельвинов. Когда Вселенная остановится и начнет сжиматься, то температура реликтового излучения тоже начнет расти. При коллапсе Вселенной до размера в несколько световых лет, температура фонового излучения увеличится до десятков миллиардов градусов. Это будут уже не фотоны, а гамма-кванты, которые обладают настолько большой энергией, что разбивают ядра любых химических элементов, включая самые прочные ядра атомов железа. Все атомные ядра распадаются в этой огненной среде и снова становятся газом из отдельных барионов – протонов и нейтронов (фактически, «улемом» Гамова). «Улем» разбрасывается в ходе очередного Большого взрыва. Когда температура излучения достаточно упадет, то из протонов, нейтронов и электронов образуется

водород и небольшое количество дейтерия и гелия. Из этой газовой среды возникнут звезды, которые снова будут накапливать ядра тяжелых элементов, необходимых для жизни и разума. Барионно-фотонный цикл замыкается – надежный и безотходный.

2. Барионно-чернодырный цикл

В осциллирующей (периодической) Вселенной все должно подчиняться циклам, причем взаимосвязанным. Например, барионное вещество не только взаимодействует с фотонами и друг с другом, оно, как было установлено в первой половине 20 века, еще и порождает черные дыры в процессе звездной эволюции, а потом само поглощается растущими черными дырами. Как достигается стационарность барионной компоненты, если она проваливается в черные дыры?

В модели, где видимая Вселенная избавляется от самой Большой Черной Дыры, достигается и равновесие между черными дырами и барионным веществом: небольшие дыры все время поглощают его, но самая Большая Дыра снова освобождает почти все барионное вещество мира (для наблюдателей, которые попали внутрь этой самой большой дыры). На первый взгляд, барионное вещество, которое попало в черные дыры звездных масс и в сверхмассивные дыры, не возвращается в наше пространство и остается невидимым, спрятанным внутри черных дыр. Но на самом деле, это вещество постепенно переходит от маломассивных дыр в самые массивные, а когда самые массивные из них сливаются в самую большую черную дыру, то значительная доля ранее поглощенного барионного вещества возвращается в кругооборот видимого вещества Вселенной. Таким образом, барионное вещество нашего мира существует как в виде видимого вещества звезд и туманностей, так и в виде невидимых барионов, спрятанных внутри черных дыр. И эти барионы тоже проходят цикл – от попадания в дыры звездных масс до выпуска барионного вещества из самой Большой Черной Дыры снова в обитаемый космос.

Точно такое же рассуждение применимо и к ответу на вопрос: почему не растет (или не падает) количество фотонов от цикла к циклу? Или не увеличивается плотность гравитационных волн? Потому что, суммарный объем популяции черных дыр не

меняется от цикла к циклу (если его замерять в определенный момент цикла, например, при максимальном сжатии), следовательно, они не могут вместить барионов, фотонов и гравитационных волн больше определенного количества.

Гравитационные волны генерируются черными дырами и образуют с ними отдельный цикл.

3. Чернодырно-гравволновой цикл *)

Этот цикл самый новый и фундаментальный, потому что черные дыры и гравитационные волны являются основными компонентами пульсирующей Вселенной. При сжатии Вселенной черные дыры сливаются друг с другом, порождая всплеск гравитационного излучения и уменьшение гравитационной массы Вселенной. Это уменьшение гравитационной массы обеспечивает антигравитацию, которая является динамической пружиной Большого взрыва. При расширении Вселенной, черные дыры снова растут по массе, поглощая гравитационные волны и вызывая эффект гипергравитации. Черные дыры являются основной гравитирующей компонентой Вселенной, а гравитационные волны – ее основным энергетическим ресурсом, наоборот, не имеющим собственной гравитационной массы. Вселенная представляет собой своеобразный маятник в виде системы «черные дыры - гравитационные волны».

**) Терминологическое примечание. Черные дыры и гравитационные волны, ранее вошедшие в науку в качестве экзотических феноменов, в настоящее время стали популярными объектами изучения и оказались важными компонентами Вселенной. Нелогично называть такие важные физические объекты сочетанием из двух слов, которые, в свою очередь, приводят к таким длинным и неуклюжим прилагательным, как «гравитационно-волновые» и «чернодырные». Можно предложить терминологическим группам Международного астрономического союза (IAU) рассмотреть вопрос о более коротких и удобных синонимах для обозначения черных дыр и гравитационных волн. Можно вспомнить введенный Эйнштейном в 1918 году (см. Приложение I) термин «G-поле» для обозначения гравитационного поля. Если для гравитационных волн удовлетворительным может быть вариант «гравволна» (или «граволна»), то термин «черные дыры» при всей его известности и*

эффективности, не имеет никаких заменителей, кроме аббревиатуры ЧД. Возможно, стоит использовать термин «геон», введенный Уилером для гипотетического гравитирующего объекта, который не привлек большого внимания. Термин «шварццион» тоже хорошо подходит в качестве интернационального синонима к «черной дыре»: он того же «цвета» и ассоциировался бы с фамилией К. Шварцшильда, предсказавшего черные дыры в ОТО.

В случае обычного маятника, реальная кинетическая энергия переходит в потенциальную гравитационную энергию (которая является «псевдоэнергией»), после чего происходит обратный процесс - и это обеспечивает циклическое колебание маятника. В случае Вселенной гравитационная масса популяции черных дыр быстро уменьшается, сбрасывая энергию в резервуар гравитационных волн, после чего происходит медленный обратный процесс превращения энергии гравитационных волн в гравитационную массу черных дыр. Первая часть этого циклического процесса обеспечивает Большой взрыв и расширение Вселенной, а вторая – растяжение поля галактик, характеризующееся эффектом положительной космологической постоянной, остановку расширения Вселенной и ее коллапс (рис. 8 и рис. 9).

Нужно отметить, что понятие черной дыры хорошо определяется для покоящегося внешнего наблюдателя. Для падающего наблюдателя ввести понятие черной дыры или горизонта событий уже значительно сложнее – он легко проникает сквозь поверхность черной дыры. В парадоксальное положение попадают наблюдатели в сжимающейся Вселенной (мы рано или поздно тоже окажемся в их роли): для небольших дыр, мимо которых эти наблюдатели пролетают, они – внешние, поэтому эти дыры для них обладают классическими свойствами черных дыр. Внутренняя часть Метагалактики, куда летят все коллапсирующие наблюдатели, уже не является чем-то сторонним для них. Поэтому им трудно решить, является ли черной дырой какое-то скопление вещества впереди них.

Падающий наблюдатель будет легко преодолевать все встречающиеся на пути горизонты Шварцшильда в своем стремлении добраться до точки сингулярности, а вернее, до самого сжатого состояния Вселенной, за которым последует Большой отскок или Большой взрыв.

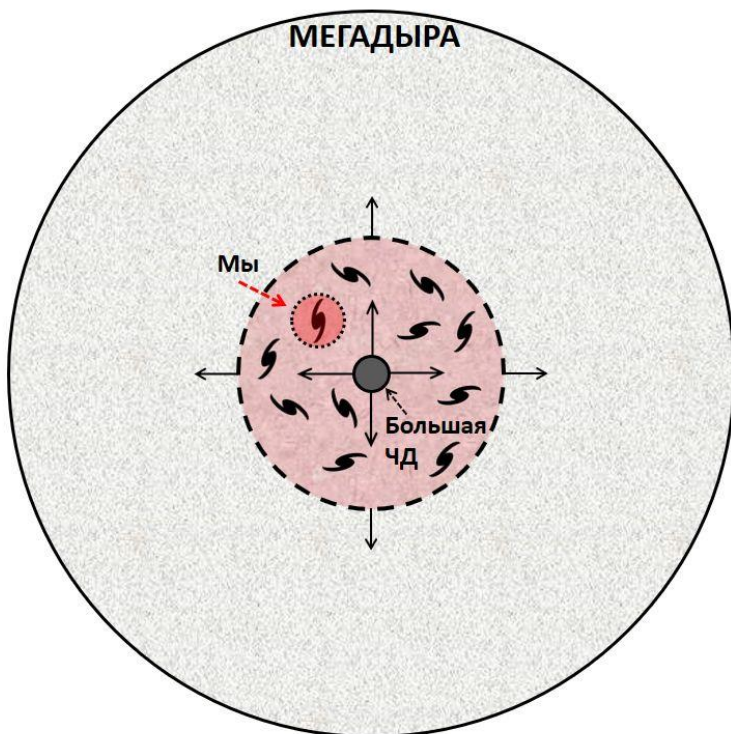


Рис.9а. Модель циклической Вселенной в черной дыре (современная стадия расширения). Стационарная черная Мегадыра содержит пульсирующую часть Вселенной с полем галактик, которая расширяется (ее граница отмечена штрихованной линией). Мы будем называть эту часть Вселенной Метагалактикой. Окружающая нас часть Вселенной показана кружком другого оттенка с границей из точек. Большая черная дыра в центре Вселенной пока мала, но расширяется, увеличивая свою массу.

При обсуждении топологии Вселенной обычно утверждается, что гравитации наблюдаемого вещества недостаточно для замыкания нашего мира, даже с учетом темной материи. Оценки гравитирующей материи делаются прямым подсчетом материальных объектов - по их излучению, или поглощению, или гравитационному линзированию. Кроме того,

возмущения гравитирующей среды отражаются в неоднородностях реликтового излучения, что дает еще один способ оценки самогравитации Вселенной.

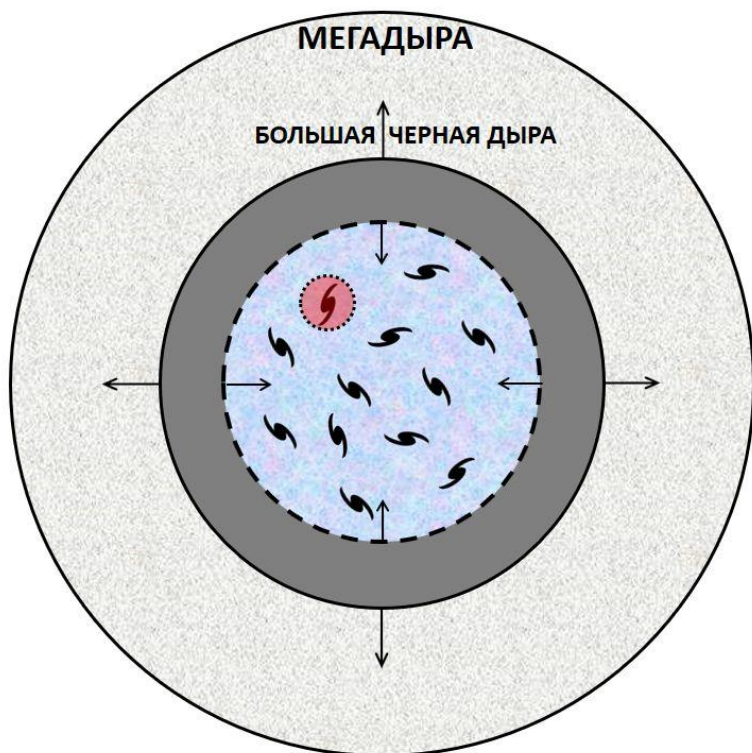


Рис.9б Модель циклической Вселенной в черной дыре (стадия сжатия). Большая черная дыра в ходе своего расширения остановила разбегание поля галактик (Метагалактики), поглотила их и заставила двигаться к центру Вселенной. Сама БЧД продолжает расширяться, поглощая фоновые гравитационные волны, и асимптотически (в пределе) стремясь к размеру (и статусу) Мегадыры.

Такой анализ приводит к выводу, что гравитационные волны, в предположении их самогравитации, являются несущественной космологической примесью. Но гравитационное излучение – весьма нетривиальный феномен, оно, согласно трактовке Эйнштейна-Эддингтона-Шредингера, не обладает собственным гравитационным полем и не дает вклада в

флуктуации самогравитирующей среды, тем самым, выпадает из такого анализа. Одновременно, при взаимодействии с детектором, гравитационная волна переводит свою негравитирующую псевдоэнергию в реальную энергию детектора, которая гравитирует. Примерами гравитационных детекторов являются, например, свободно подвешенные зеркала в детекторе LIGO и такие абсолютные поглотители гравволн, как черные дыры. Черная дыра поймает гравитационное излучение и соответственно увеличит свою массу. Поэтому, когда Большая Черная Дыра проглотит Млечный Путь, то мы по-прежнему будем считать, что плотность среды недостаточна для черной дыры. Но если учесть весь спектр фонового гравитационного излучения и подсчитать его энергию (с математической помощью псевдотензора), то полученная энергия будет достаточной для образования черной дыры. Фактически, гравитационное излучение является недостающей и трудноуловимой компонентой для замыкания Вселенной.

Циклическая Вселенная похожа на великолепно отлаженный часовой механизм, в котором все жестко взаимосвязано и взаимозависимо. Выше мы рассмотрели три главных шестеренки этого механизма - три наиболее важных цикла, в которые вовлечены основные компоненты Вселенной:

1. Барионы – фотоны
2. Барионы – черные дыры
3. Черные дыры – гравитационные волны

Конечно, космологические циклы существуют для всего, например, для атомов железа или золота, для галактик, звезд и т.д. Обычно они являются частью главных циклов, но могут образовывать и отдельные циклы.

Примечательной особенностью обсуждаемой модели является то, что она полностью построена на классической теории гравитации с привлечением хорошо проверенных фактов из квантовой механики и ядерной физики – как в случае эффекта фотодиссоциации атомных ядер. Для создания данной космологической теории не было сделано ни одного предположения вроде существования неизвестных сил, полей или размерностей, а также не было введено ни одной новой фундаментальной константы. Если в предполагаемых зависимостях и появляются феноменологические величины, то

они имеют временный характер и будут в дальнейшем заменены на физические параметры, вычисленные в рамках более детальных моделей.

Квантовая гравитация оказалась ненужной для построения космологии и решения проблемы сингулярности. Это не означает, что квантовая гравитация не может быть построена. Вполне возможно, что такая теория будет создана и выявит новые, глубинные связи между бозонами Хиггса, гравитирующей материей и искривленным пространством-временем. Но все основные пружины динамики Вселенной могут быть объяснены в рамках теории гравитации Эйнштейна (и даже ньютоновской динамики с обобщением на конечность скорости распространения гравполя) и уже развитой теории квантов и атомов. Вероятнее всего, любые будущие углубленные теории гравитации не окажут существенного влияния на развиваемые ныне космологические модели Вселенной. Рецепт кипячения воды в чайнике не зависит от развития квантовой механики и от знания, что вода состоит из молекул.

Часть IV. Предсказания и подтверждения циклической космологии

Вселенная начинает свое существование из сверхплотного и сверхгорячего состояния, расширяется до максимальных размеров, а затем снова сжимается и коллапсирует - никогда более не делалось предсказания, внушающего столь благоговейное чувство.

Ч. Мизнер, К. Торн и Дж. Уилер (1973)

14. Эмпирические тесты новой модели

Каждое опровержение следует рассматривать как большой успех, и успех не только того ученого, который опроверг теорию, но также и того ученого, который создал опровергнутую теорию и тем самым первым, хотя бы и косвенно, предложил опровергающий эксперимент.

Карл Поппер (1963)

Любые теории ценны не сами по себе, а лишь как способ объяснения наблюдаемых явлений. Если самые красивые физические теории не согласуются с наблюдениями, то их научная ценность равна нулю. Но сопоставление теории с наблюдениями (или экспериментами) вовсе не такая простая вещь, как может показаться на первый взгляд.

14.1 Критерии Поппера: неопровергаемая теория ошибочна

*Астрологи... не обращают
никакого внимания на*

неблагоприятные для них примеры. Более того, делая свои интерпретации и пророчества достаточно неопределенными, они способны объяснить все, что могло бы оказаться опровержением их теории, если бы она и вытекающие из нее пророчества были более точными. Чтобы избежать фальсификации, они разрушают проверяемость своих теорий. Это обычный трюк всех прорицателей: предсказывать события так неопределенно, чтобы предсказания всегда сбывались, то есть, чтобы они были непроверяемы.
Карл Поппер (1963)

Квантовая космология и, в частности, теория инфляции исходят из смелой гипотезы, что динамика Вселенной определяется еще неоткрытыми квантовыми полями и частицами. Несмотря на усилия тысяч ученых и потраченные миллиарды долларов, не было получено ни одного прямого экспериментального подтверждения существования таких полей и частиц, а также не удалось убедительно обосновать эту гипотезу с точки зрения теории. Наука старается объяснить непонятное с помощью известного, поэтому многим ученым трудно согласиться с тем, что в квантовой космологии одно непонятное объясняется другим, еще более загадочным и запутанным. Из-за такого нагромождения тайн Вселенная стала часто рассматриваться как невероятно сложный объект. Королевский астроном, барон Мартин Рис в одном из интервью уныло сказал, что люди, со своими слабыми мозгами, может быть, никогда не узнают, как на самом деле устроена Вселенная - как мартышки, которые обречены на непонимание теории Эйнштейна.

Глубокий мыслитель и философ Карл Поппер (1902-1994) выдвинул критерии, которым должна удовлетворять успешная

научная теория. Он писал в 1963 году: «...мы требуем, чтобы новая теория была *независимо проверяема*. Это означает, что независимо от объяснения всех фактов, которые была призвана объяснить новая теория, она должна иметь новые и проверяемые следствия (предпочтительно следствия *нового рода*), она должна вести к предсказанию явлений, которые до сих пор не наблюдались. Это требование кажется мне необходимым, так как теория, не выполняющая его, может быть теорией *ad hoc*, ибо всегда можно создать теорию, подогнанную к любому данному множеству фактов».

Классический пример: теория Эйнштейна в 1915 году была завершена в математическом смысле. С теоретической точки зрения, она была хороша тем, что была общерелятивистской и переходила для случая слабых полей в теорию гравитации Ньютона. С наблюдательной точки зрения, она достигла успеха в объяснении загадочного аномального смещения перигелия Меркурия. Но этого было недостаточно для общего признания этой теории. Эйнштейн предсказал, что искривление света звезды в поле Солнца будет в 2 раза больше чем в ньютоновской теории. В 1919 году это искривление было измерено Эддингтоном, и величина отклонения изображения звезды указала на справедливость теории Эйнштейна – только после этого ОТО стала широко распространяться в научной среде.

Сто лет спустя, о такой однозначности и проверяемости космологических теорий можно только мечтать. В 2013 году команда космической обсерватории «Планк» опубликовала новые карты реликтового излучения. Появилось две интерпретации этих результатов: инфляционисты объявили, что они полностью подтверждают теорию инфляции, и что книга космологии дописана до конца! С другой стороны, Пол Стейнхард (профессор из Принстона, один из основателей теории инфляции), Абрахам Лоеб (профессор, главный астроном Гарварда) и молодой доктор наук из Германии Анна Иджас, пришли к противоположному выводу! Они опубликовали статью в январском номере «Scientific American» за 2017 год, где утверждали на основе результатов «Планка»: «Последние астрофизические измерения вместе с теоретическими проблемами вызывают сомнения в общепринятой инфляционной

теории ранней Вселенной и указывают на то, что нам нужны новые идеи». Это расхождение мнений означает, что в рамках инфляционной теории не было сделано однозначного предсказания, которое можно было бы проверить данными «Планка».

Трио этих авторов применили критерии Поппера к квантовой теории инфляции. Они пишут: «Инфляция требует, чтобы Вселенная была заполнена энергией высокой плотности, которая гравитационно самоотталкивается, тем самым усиливая расширение и заставляя его ускоряться. Однако важно отметить, что этот важнейший ингредиент, называемый инфляционной энергией, является чисто гипотетическим; у нас нет прямых доказательств его существования. Более того, за последние 35 лет выдвинуто буквально сотни предположений относительно того, какой может быть инфляционная энергия, каждое из которых порождает очень разные темпы инфляции и очень разные суммарные величины растяжения. Таким образом, очевидно, что инфляция - это не точная теория, а очень гибкая структура, охватывающая множество возможностей». Авторы считают, что теория инфляции малоприспособлена для новых предсказаний: «Сможем ли мы предсказать количество и расположение галактик в космосе? Насколько пространство искривлено и изогнуто? Количество материи или других форм энергии, из которых состоит нынешняя Вселенная? Ответ - нет. Инфляция - настолько гибкая идея, что возможен любой результат».

Эта статья инициировала знаменитую дискуссию 2017 года и вызвала ответную статью, в которой 33 автора, включая нобелевских лауреатов, выступили в защиту инфляции. Не вдаваясь в детали этого спора, вспомним историю, которая случилась несколькими годами раньше. Группа ученых, анализирующих данные антарктической обсерватории ВИСЕР, которая работает на Южном Полюсе, объявила в марте 2014 года об открытии следов гравитационных волн, предсказанных теорией инфляции. Это было воспринято как триумф теории инфляции. Вот как высказывались весной 2014 года научные обозреватели и сторонники теории инфляции:

«Недавние результаты, полученные на установке ВИСЕР2 рядом с Южным Полюсом, показывают, что амплитуда

гравитационных волн может оказаться очень большой, вплоть до $r = 0.2$, близко к тому, что предсказывают простейшие варианты хаотической инфляции. Если эти результаты подтвердятся, то это достижение будет сопоставимо по значению с открытием бозона Хиггса». (Андрей Линде, газета «Троицкий вариант»)

«...инфляция – прекрасная теория, у которой есть большие проблемы с наблюдательным подтверждением. Важность результата WICEP (точнее, установки второго поколения WICEP2), если он окажется верен, – именно в подтверждении инфляционной модели». (Сергей Попов, «Радио Свобода»)

«В астрофизическом сообществе это сообщение вызвало эйфорию, и она вполне оправдана. Результат WICEP2 — если он действительно подтвердится — впервые открывает возможность экспериментальной проверки свойств Вселенной в эпоху космической инфляции, отстоящую от момента Большого взрыва на ничтожную долю секунды. Теория инфляционной вселенной, оставшаяся до сих пор любопытной, захватывающей воображение, пусть правдоподобной — но все-таки гипотезой, превратилась в факт биографии нашей реальной Вселенной» (Игорь Иванов, elementy.ru).

История с WICEP имеет два интересных момента.

Во-первых, поверив в то, что открытые гравитационные волны стали железным доказательством теории инфляции, ряд научных обозревателей откровенно признали, что раньше теория инфляции была лишь «гипотезой», которая имела «большие проблемы с наблюдательным подтверждением».

Во-вторых, три месяца спустя, в июне 2014 года, это «открытие» гравитационных волн было опровергнуто – полученный сигнал оказался связан не с гравитационными волнами, а с распределением космической пыли. И знаете, что вызывает тревогу? Не сама ошибка наблюдений, отчего никто не застрахован, а тот факт, что «гибкая» теория инфляции легко пережила эту историю! Потому что у нее осталось достаточно вариантов, которые предсказывают практически любой уровень гравитационных волн.

Это настораживает любого трезвого ученого. Оглядываясь на критерии Карла Поппера, применимые ко всем научным теориям, логично задаться вопросом: не является ли теория

инфляции многопараметрической моделью *ad hoc*? Она построена для объяснения существующих фактов (и успешно делает это с помощью подкручивания имеющихся свободных параметров), но не способна предсказать конкретные эффекты, которые могли бы ее фальсифицировать – или бесспорно (без споров!) ее подтвердить. Инфляционисты своей гибкостью успешно избегают фальсифицируемости своих моделей, одновременно разрушая их проверяемость – в полном соответствии с анализом Карла Поппера.

Еще раз подчеркнем теоретическую необоснованность теории инфляции. Любая космологическая модель, которая не вводит ранее неизвестных сущностей, неизмеримо предпочтительнее любых гипотез, которые базируются на гипотетических трюках. Выход за рамки проверенных теорий дает космологическим моделям такую свободу, что вопрос о наблюдательных проверках отступает на второй план.

Когда книжный герой для решения своих проблем достает из кармана волшебную палочку, то книга сразу переходит из жанра реализма в фэнтези. Когда космолог предполагает существование скалярного антигравитирующего поля (гипотеза «инфлатона») в начале расширения Вселенной или использует идею множества вселенных с различными наборами физических законов (гипотеза «мультиверса»), то он совершает аналогичную смену жанра. Конечно, у таких гипотез есть, как масса сторонников (как и у жанра фэнтези), так и множество противников. Например, Сабина Хоссенфельдер в своей книге «Уродливая вселенная» (2020) так описывает разноречивые мнения относительно «мультиверса»:

«Космолог Пол Стейнхардт называет идею мультивселенной «вычурной, неестественной, непроверяемой и, наконец, опасной для науки и общества». По словам Пола Дэвиса, это «лишь безыскусный деизм, обряженный в одежды научного языка». Джордж Эллис предостерегает, что «сторонники мультивселенной... неявным образом переопределяют понимаемое под словом «наука». Дэвид Гросс считает, что «тут пахнет ангелами». С точки зрения Нила Турока, это «полнейшая катастрофа». Популяризатор науки Джон Хорган сетует, что «теории о мультивселенной не есть

теории — это научная фантастика, теология, построения, созданные воображением и не стесненные доказательствами».

Противоположной точки зрения в этом споре придерживается, например, Леонард Сасскинд: он находит «волнующей мысль, что Вселенная, возможно, гораздо больше, богаче и разнообразнее, чем мы когда-либо думали». Бернанд Карр полагает, что «понятие мультивселенной подразумевает новое понимание природы науки, поэтому неудивительно, что это вызывает интеллектуальный дискомфорт». Макс Тегмарк утверждает, что противники мультивселенной «эмоционально предубеждены против смещения всех нас из центра внимания». А Том Зигфрид думает, что критика идеи о мультивселенной «того же рода, как и та, что заставила некоторых ученых и философов XIX века отрицать существование атомов». Ух.»

Про идею инфляции Иджас, Стейнхардт и Лоеб пишут: «Учитывая все эти проблемы, перспектива того, что инфляции никогда не было, заслуживает серьезного рассмотрения. Если мы сделаем шаг назад, то появятся две логические возможности. Либо у вселенной было начало, которое мы обычно называем «большим взрывом», либо не было начала, и то, что было названо большим взрывом, на самом деле было «большим отскоком», переходом от некоторой предшествующей космологической фазы к нынешней фазе расширения».

Несмотря на 40 лет развития и широкую популярность, одноразовая инфляционная космология не смогла бесспорно доказать свое преимущество — ни в теоретическом, ни в наблюдательном аспекте — над другими моделями. Это говорит о том, что внутри инфляционной модели Вселенной есть принципиальные проблемы, которые не решаются со временем, а наоборот — все больше входят в противоречие с наблюдениями. Отдавая безусловное предпочтение циклической модели Вселенной, которая, с теоретической точки зрения, не использует ни одного теоретического предположения *ad hoc*, рассмотрим вопрос о ее фальсифицируемости и проверяемости с точки зрения наблюдений.

14.2 Предсказания новой теории циклической Вселенной

***Истина не является единственной целью науки. Мы хотим большего, чем просто истины: мы ищем интересную истину – истину, которую нелегко получить.
К. Поппер (1963)***

Изучение Вселенной ведется, главным образом, с двух направлений – наблюдательными методами классической астрономии и теоретическим моделированием - обычно в парадигме квантовой космологии. Квантовые космологи активно пропагандируют среди широкой публики свои экзотические модели, параллельные миры и мультивселенные. Но классические астрономы не могут использовать в своей работе все эти ненаблюдаемые сущности, поэтому они фокусируются на изучении цефеид и взрывов сверхновых, чтобы уточнить лестницы космологических расстояний; строят детекторы гравитационных волн с частотой в сотню герц и наблюдают миллисекундные пульсары для наблюдения наногерцовых гравволн. Они изучают гравитационное линзирование света вокруг галактик и их скоплений и распределение темной материи в них (иллюстрации 4-6). Они ищут и изучают черные дыры, включая самые ранние и сверхмассивные (иллюстрации 8-12).

Современная космология движется вперед, в основном, благодаря успехам наблюдательной астрономии. Мы считаем, вслед за Карлом Поппером и всеми здравомыслящими учеными, что корректная теория должна предсказывать новые наблюдаемые эффекты, причем эти предсказания должны быть максимально конкретными. В циклической космологии можно выделить следующие области предсказаний:

- I. Замкнутость Вселенной, которая эквивалентна нахождению в очень большой черной дыре (Мегадыре) с радиусом порядка триллиона световых лет. Отсюда следует, что наблюдения должны выявить:
 1. Небольшую положительную кривизну пространства.
 2. Заметную глобальную анизотропию.
 3. Существенную глобальную неоднородность.
- II. Накопление самых неразрушимых компонент Вселенной из цикла в цикл (черных дыр, гравитационных волн, и,

возможно, нейтронных звезд). Процессы накопления и разрушения (слияния) должны приводить к определенному распределению (спектру) этих компонент – по массам, концентрациям, частотам и т.д. Это означает, что можно сделать ряд достаточно конкретных предсказаний о:

1. Темной материи из черных дыр.
2. Сверхмассивных дырах.
3. Реликтовых нейтронных звездах.
4. Реликтовом гравитационном излучении.

III. Роль реликтовых сверхмассивных черных дыр в формировании галактик. Они могут объяснить:

1. Быстрый рост галактик вокруг СМЧД.
2. Различие в механизмах формирования дисковых и эллиптических галактик.
3. Связь массы СМЧД с глобальными характеристиками галактик - такими, как дисперсия скоростей звезд в балдже («М-сигма» отношение).
4. Объяснение связи масс и периферийных скоростей движения галактик (законы Талли-Фишера и Фабера-Джексона).
5. Наблюдаемую анизотропию распределения направления осей вращения галактик.

Фундаментальный вопрос космологии – является ли Вселенная замкнутой или разомкнутой? – обсуждается уже более ста лет. Наблюдений, которые могли бы сделать выбор между этими вариантами, долгое время не было. Ричард Толмен писал в 1934 году: «...мы не можем сказать, является ли реальная Вселенная пространственно открытой или закрытой и вынуждены делать выбор между этими возможностями, исходя только из несколько сомнительных соображений метафизического характера».

Только в последние десятилетия стал накапливаться эмпирические свидетельства по вопросу глобальной кривизны и закрытости Вселенной. Споры об том, закрыта или открыта Вселенная, чем-то напоминают средневековые споры плоскоземельщиков и коперниканцев, которые полагали Землю шарообразной. Очевидно, что с помощью локальных наблюдений, охватывающий небольшой участок Земли (или

Вселенной), трудно определить – является ли она плоской или шарообразной (или искривленной). Это можно понять лишь при более глобальном взгляде на нашу планету (или Вселенную).

Спутник WMAP приступил к наблюдениям в 2001 году, получив высокоточную карту реликтового излучения. При сравнении теоретического спектра реликтовых флуктуаций с наблюдениями WMAP, выяснилось, что амплитуда наблюдаемых крупномасштабных вариаций, особенно квадрупольных, заметно ниже теоретически ожидаемых значений (в космологии этот эффект известен, как «проблема низкого квадрупольа»). В ряде статей была выдвинута гипотеза о том, что эта проблема указывает на положительную кривизну пространства или на замкнутость Вселенной, и было показано, что учет такой кривизны улучшает согласие теории и наблюдений.

Аналогичный вывод о замкнутости Вселенной был сделан на основе анализа данных спутника Planck, запущенного в 2009 году, который позволили составить улучшенную карту реликтового излучения. Статья на эту тему, опубликованная в Nature в 2020 году, собрала за два года около 300 ссылок и вызвала оживленную дискуссию. На тему закрытости Вселенной даже стали защищать диссертации (Hergt, 2020; Hergt et al., 2022). Разбор дискуссии о замкнутости Вселенной не входит в задачу этой книги. Отметим лишь, что если данные WMAP и Planck согласуются с небольшой положительной кривизной пространства даже в рамках однородной космологической модели, то тем более этого можно ожидать от неоднородной модели.

Осциллирующая модель предполагает закрытую Вселенную. В свою очередь, инфляционисты предпочитают плоскую открытую Вселенную – и даже долгое время считали это предсказание своим достижением. Но вопрос о закрытости Вселенной не может быть ключевым экспериментом по выбору между циклической Вселенной и одноразовой инфляционной моделью, потому что, точно следуя анализу Поппера, инфляционисты избегают фальсифицируемости своей модели и готовы подстроиться под любой вариант наблюдений: как только появились публикации о том, что данные Планка указывают на закрытость Вселенной, появились десятки работ по

инфляционной теории в замкнутой Вселенной (см, например, Hergt et al., 2022).

Поэтому для выбора между этими двумя конкурирующими моделями нужно рассмотреть более специфические предсказания циклической космологии, которым будут посвящены последующие разделы.

15. Формирование галактик и шаровых скоплений

И как объяснить, что вопреки Второму закону термодинамики, который в его привычном толковании говорит о неизбежном возрастании хаоса и тепловой смерти Вселенной, сама сущность энтропии Вселенной возникла на самом деле с момента ее зарождения?

И. Пригожин, И. Стенгерс (1990)

15.1 Неустойчивость Джинса и образование шаровых скоплений

Согласие астрономии и космологии балансирует на грани; бедные металлами шаровые скопления — самые старые звездные системы во Вселенной — продолжают оставаться предметом напряженного интереса со стороны наблюдателей.

Ольга Сильченко (2017)

Через 380 тысяч лет после Большого взрыва, расширяющаяся водородная плазма охладилась до 3 тысяч кельвинов, что вызвало рекомбинацию протонов и электронов и образование атомарного водорода. Такая среда стала прозрачной для фотонов – именно они, растянувшиеся за миллиарды лет в тысячу раз, наблюдаются сейчас в виде реликтового излучения. В среде из темной материи и водорода начала развиваться

джинсовская гравитационная неустойчивость (см. Приложение II). Образование сферических облаков Джинса из смеси темной материи, водорода и гелия подтверждается тем, что массы этих облаков хорошо соответствуют массам наблюдаемых шаровых скоплений старых звезд (Peebles, 1993). Вслед за многими авторами, мы полагаем, что облака Джинса с массой $\sim 10^5 M_{\odot}$ стали первыми структурами, образовавшимися после Большого взрыва. Согласно сценарию, изложенному, например, у Силка (1982), именно эти облака играют ключевую роль в дальнейшем формировании галактик.

Но если темная материя состоит из черных дыр, то большая часть образовавшихся облаков Джинса должна образовывать шаровые скопления черных дыр, аналогичные, по массе и возрасту, шаровым скоплениям из звезд. Процесс их обнаружения весьма затруднителен, так как у них нет (или очень мало) газово-звездной составляющей. Тем не менее, такие темные скопления уже начали открываться: термин «темные шаровые скопления» (или «темные звездные скопления») введен в статье Тейлора с соавторами (2015), которые открыли возле галактики Центавр А новый класс шаровых скоплений с аномально высоким отношением «масса/светимость». Taylor et al. (2015) полагают, что эти темные скопления могут содержать большое количество темной материи или черную дыру промежуточной массы. Мы полагаем, что темные скопления, обнаруженные возле галактики Центавр А, представляют собой лишь небольшую видимую часть обширной популяции малозаметных скоплений черных дыр, составляющих темное гало галактик (см. рис.10). Для формирования темного гало возле Млечного Пути с массой в $\sim 10^{12} M_{\odot}$ потребуется $\sim 10^7$ темных шаровых скоплений с массами $M \sim 10^5 M_{\odot}$.

В чем разница между темными и яркими (со звездами) шаровыми скоплениями? В статье Горькавого и Тюльбашева (2021) выдвинуто предположение, близкое к гипотезе Taylor et al. (2015): разница заключается в том, что в некоторых шаровых скоплениях, возникших после эпохи рекомбинации, содержатся не только черные дыры звездных масс (до 100 масс Солнца), но и достаточно крупная черная дыра промежуточной массы (до 100 тысяч солнечных масс). Такие дыры, благодаря своему размеру, значительно повышают возможность захвата (или удержания)

газа шаровым скоплением. Ключевым моментом является захват газового облака черной дырой и образование плотного аккреционного диска. Такой диск образует своеобразный «сачок», с помощью которого темп захвата межзвездного газа возрастает многократно. Именно из такого накопленного газа и вырастают звезды, которые превращают темное скопление в классическое яркое шаровое скопление со старыми звездами (рис.10). Таких ИМВН относительно немного, поэтому ярких шаровых скоплений будет в десятки тысяч раз меньше, чем темных скоплений. Это предсказание можно проверить астрономическими наблюдениями.

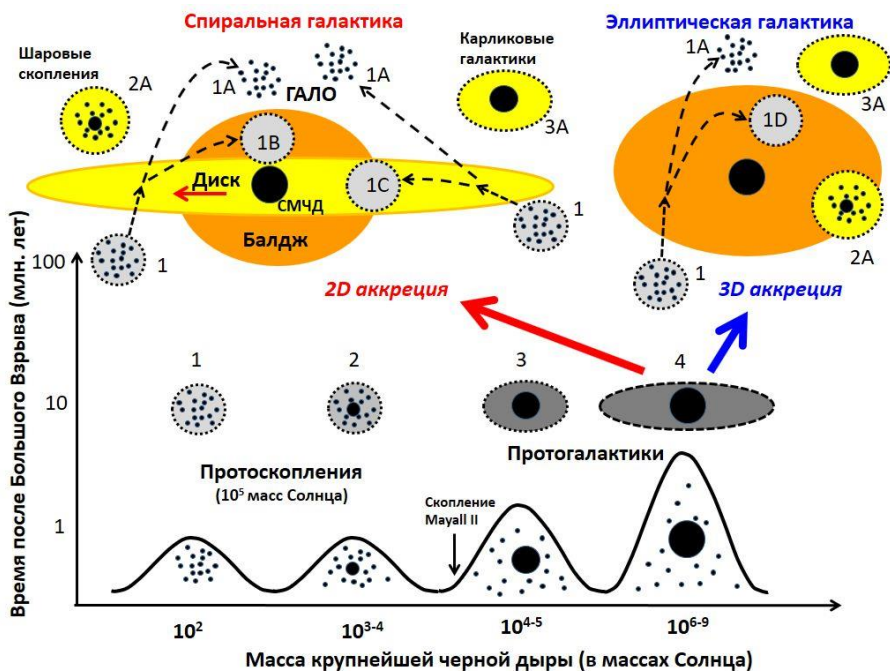


Рис. 10. Схема образования и эволюции облаков Джинса и протогалактик в современные дисковые и эллиптические галактики с гало и шаровыми скоплениями звезд.

На рис.10 цифрой 1 отмечены облака Джинса, содержащие только черные дыры звездных масс (SBH); при взаимодействии с галактикой эти облака разделяются на темные шаровые скопления 1А из черных дыр, попадающие в гало галактики, и на газовую компоненту (1В, 1С, 1D),

присоединяющуюся к газовой подсистеме галактик. 1В – газовое облако, которое возникло при встречном соударении облака Джинса и вращающегося диска: оно обладает малым угловым моментом и падает в центральную часть галактики (балдж); 1С – облако с совпадающим направлением движения и большим угловым моментом, которое захвачено в диск галактики; 1D – газовые облака, которые возникают при взаимодействии облаков Джинса с эллиптическими галактиками и имеют различные ориентации орбитального углового момента, что приводит, после усреднения, к малому суммарному моменту этих облаков и самой галактики. Цифрой 2 отмечены облака Джинса, содержащие не только небольшие SBH, но и черную дыру промежуточной массы. Это позволяет им создавать яркие шаровые скопления 2А. Звездное скопление Mayall II, которое обладает массой в 10 миллионов масс Солнца и центральной черной дырой массой в $2 \cdot 10^4 M_{\odot}$, может рассматриваться как переходная форма между шаровыми скоплениями и карликовыми (прото)галактиками (3)3А, которые образуются вокруг черных дыр с массой в $10^{4-5} M_{\odot}$. Вокруг сверхмассивных черных дыр образуются крупные протогалактики (отмечены цифрой 4), которые эволюционируют в дисковые и эллиптические галактики, в зависимости от реализуемого типа аккреции – двумерной или трехмерной.

Черные дыры звездных и промежуточных масс сохраняются при переходе через максимально сжатое состояние Вселенной. Разрушаются ли в сжатой Вселенной темные реликтовые скопления? Это интересный вопрос, для ответа на который нужно построить более детальные динамические модели. Возможно, что все темные скопления возникают заново в каждом цикле Вселенной, но не исключено, что часть темных скоплений является реликтовыми - приходящими из прошлых циклов.

15.2 Рост спиральных и эллиптических галактик вокруг сверхмассивных черных дыр

Как всегда, теоретикам портят жизнь высококачественные наблюдения... Еще совсем недавно

теоретики говорили уверенно: на $z > 1$ скоплений галактик не существует. Однако наблюдения и тут все испортили.
Ольга Сильченко (2017)

Традиционной моделью образования галактик является иерархическая модель, согласно которой небольшие галактики постепенно сливаются, образуя все более крупные галактики. Книга опытного наблюдателя Ольги Сильченко «Происхождение и эволюция галактик» (2017 год), написанная живым языком, не оставляет камня на камне от иерархической модели образования галактик! О. Сильченко пишет: «По иерархической концепции, распределение плотности вещества во Вселенной эволюционирует от почти совсем однородного в эпоху рекомбинации до сильно структурированного, скученного, в нашу эпоху... Наблюдательный же факт, установленный вполне надежно, состоит в том, что... практически за все время жизни Вселенной не произошло никакой эволюции степени скученности галактик... Как это может быть?»

В иерархической концепции, пишет О. Сильченко, «чтобы объяснить наблюдаемую корреляцию «масса—металличность» у эллиптических галактик (чем массивнее галактика, тем выше содержание тяжелых элементов в ее звездах), приходится предполагать, что каждое слияние двух дисковых галактик сопровождается вспышкой звездообразования. Тогда при каждом «укрупнении» галактик будут производиться новые тяжелые элементы и таким образом будет возрастать средняя металличность звездного населения с увеличением массы эллиптической галактики. ...Если это так, то средний возраст звездного населения в центре современных массивных эллиптических галактик должен быть относительно невелик, 3–5 млрд лет; между тем по спектрам и цветам он уверенно оценивается как более 8 млрд лет... и чем массивнее эллиптическая галактика, тем старше ее звездное население!»

Из-за проблем с иерархической концепцией образования галактик, основанной на инфляционной космологии, в последние годы становится все популярнее «аккреционная модель», согласно которой галактики образуются вокруг сверхмассивных

дыр, существовавших на самом раннем этапе расширения Вселенной (Черепашук, 2014; Долгов, 2018). Эта концепция позволяет по-новому посмотреть на старую проблему галактической космогонии: каков механизм образования разных типов галактик - как эллиптических, имеющих малый угловой момент, так и спиральных, у которых этот угловой момент заметно выше?

Вокруг центральной черной дыры на первом этапе возникает сравнительно небольшой аккреционный диск, который начинает эффективно сгребать пролетающее вещество, часто собранное в виде облаков Джинса, после чего компактный диск разрастается в целую галактику. Можно показать (см. детали в Приложении II), как в аккреционной модели образования галактик решается проблема образования эллиптических и спиральных галактик. Рассмотрим квазилобовое взаимодействие облака Джинса и сверхмассивной дыры SMBH, у которой пока еще нет диска. Облако гораздо больше дыры, и огибает ее с разных сторон. Черная дыра искривляет траектории движения частей облака так, что они, после пролета возле дыры, начинают сталкиваться друг с другом и терять скорость и энергию движения, тем самым, все облако или какая-то его часть оказывается захваченным черной дырой и должно образовать первичный аккреционный диск. Направление вращения этого диска задается случайно, в зависимости от геометрии встречи SMBH и облака.

За характерное время в несколько миллионов лет, вокруг сверхмассивных черных дыр появятся первичные аккреционные диски с плавной функцией распределения по размерам и угловому моменту вращения. Но, как это часто бывает в небесной механике, плавное изменение какого-то параметра (например, прицельного расстояния между астероидом и планетой) может приводить к кардинально различным следствиям (например, захват астероида на прямую орбиту вокруг планеты или на обратную). Так и в данном случае: разные плотности образовавшегося вокруг черной дыры диска вызвали два разных типа аккреции: трехмерную и двумерную (рис. 10).

Трехмерная аккреция возникает тогда, когда начальный аккреционный диск достаточно плотный, поэтому он захватывает все облака газа, которые пытаются пролететь через него – в

любом направлении и под любым углом. В результате трехмерной аккреции приток массы в диск оказывается максимальным, а вот приток углового момента – минимальным, потому что суммарный угловой момент захватываемых облаков, прилетающих с разных направлений, оказывается близок к нулю. Тем самым, диск растет массивным, толстым и медленно вращающимся (рис. 10).

Двумерная аккреция случается тогда, когда начальный диск вокруг дыры слишком прозрачный и неплотный. В этом случае, те облака, которые пролетают поперек диска, тормозятся слабо и улетают из системы. Захватываются в диск только те облака, чьи пролетные траектории близки к плоскости диска, потому что в этом случае масса области диска, с которой взаимодействует облако, значительно увеличивается (см. детали расчетов в Приложении II). Здесь возникает два варианта: если облако огибает дыру в том же направлении, в каком вращался аккреционный диск, тогда облако приносит в диск не только массу, но и значительный угловой момент. Если облако движется навстречу вращению диска, то при столкновении с веществом диска, происходит «аннигиляция» угловых моментов облака и части диска, которые в результате столкновения падают ближе к дыре, образуя «балдж» - более плотную и медленно вращающуюся внутреннюю область диска. Вещество балджа может питать сверхмассивную черную дыру, превращая ее в квазар (иллюстрации 8 и 9).

Можно предположить, что трехмерная аккреция приводит к образованию эллиптических галактик, в то время как двумерная аккреция должна порождать плоские дисковые галактики с центральными балджами, напоминающими по строению и вращению небольшие эллиптические галактики.

Как уже обсуждалось, есть два сценария возникновения сверхмассивных черных дыр: они возникли в ходе многократных циклов в реликтовой популяции черных дыр, или они могли образоваться из флуктуаций какой-то плотной среды или гипотетического поля в начале данного цикла. Во втором сценарии, сверхмассивные черные дыры (и галактики, которые образуются вокруг них) будут двигаться вместе со средой, из которой они возникли. В свою очередь, реликтовые сверхмассивные черные дыры, возникающие по первому

сценарию, динамически независимы и не связаны генетически с остальной плазменно-газовой средой, поэтому они логично ожидать, что они могут двигаться относительно нее с какой-то скоростью.

Предположим, что центральные дыры движутся медленнее или быстрее фонового газа, то есть имеют некоторую среднюю скорость относительно него в момент формирования галактики. Эта разница может обеспечиваться тем, что в момент Большого взрыва, газ расширялся быстрее популяции черных дыр – хотя бы из-за давления излучения. Но газ мог расширяться и медленней черных дыр – это ничего не изменит в дальнейших рассуждениях.

Если рассмотреть сближение между сверхмассивной дырой и облаком газа, то легко понять, что черная дыра и изгибающаяся в ее гравитационном поле траектория облака будут лежать в одной плоскости. Брошенный камень, пройдя по параболе, упадет на землю, двигаясь непременно в вертикальной плоскости. Нельзя бросить камень так, чтобы парабола его движения располагалась в горизонтальной плоскости.

Следовательно, плоскость диска, образовавшегося в результате захвата, тоже будет близка к плоскости траектории движения первоначального облака. Если нет систематической скорости движения дыры и окружающих облаков, то плоскости начальных аккреционных дисков будут располагаться хаотически. Пусть систематическая скорость между дырой и облаками существует и направлена по оси X , а оси Y и Z будут перпендикулярны ей. Очевидно, что облака будут налетать на дыру вдоль оси X чаще, чем с других направлений. При этом облако будет захватываться в плоскости, к которой принадлежит ось X , то есть в плоскости XY , или XZ , или в любые промежуточные, и не будет выходить на орбиты, которые лежат в плоскости YZ , поперек линии первоначального движения облака.

Следовательно, скорость относительного движения вдоль оси X между сверхмассивными черными дырами и окружающими их облаками приведет к тому, что оси образующихся дисков (и галактик, который выросли из них) будут расположены анизотропно – будет существовать направление X , которого оси дисковых галактик будут избегать.

Это соответствует глобальной квадрупольной анизотропии распределения осей галактик.

Эту естественную особенность аккреционной модели образования галактик, предполагающей существование реликтовых черных дыр, логично сопоставить с многочисленными статьями, обсуждающими квадрупольную анизотропию распределения осей вращения галактик. Например, в *Астрофизическом бюллетене* в 2009 году были опубликованы интересные статьи В. Амирханяна из ГАИШ МГУ об анизотропии распределения осей вращения галактик. В. Амирханян рассмотрел каталог из 10 тысяч галактик с джетами (струйными выбросами), направление которых должно быть близко к осям вращения галактик или аккреционных дисков вокруг центральных сверхмассивных дыр. Он с высокой достоверностью показал, что оси вращения галактик избегают определенного направления, то есть двух противоположных участков неба, которые близки к Северному и Южному полюсам Земли. В статьях Амирханяна делается обзор и предыдущих работ на эту тему: М. Рейнхарда, П. Нильсона, А. Лауберта, С. Парновского и других. Феномен анизотропии осей галактик примечателен тем, что он может проявляться и для достаточно близких галактик. Существует целая серия статей Л. Шамира из Канзасского университета об асимметрии числа левовращающихся и правовращающихся галактик, а также исследования М. Лонго из Мичиганского университета об асимметрии распределения левовращающихся и правовращающихся спиральных галактик. Эти феномены, если их достоверность будет доказана, могут быть связаны с анизотропией распределения осей вращения галактик, но для подтверждения такой связи нужен более детальный анализ.

15.3 Загадочное соотношение Талли-Фишера и реликтовые дыры

Согласно кеплеровскому закону, квадрат скорости V кругового вращения тел вокруг массивного объекта пропорционален массе M этого объекта:

$$V^2 = \frac{GM}{R} \quad (5)$$

Логично предположить, что этому закону подчиняются и звезды в галактике. Но в 1977 году Р. Талли и Дж. Фишер обнаружили противоречащую (5) закономерность $M \propto V^4$, которая связывает массу дисковой галактики M и скорость вращения V на ее краю.

Закон Талли-Фишера - один из самых таинственных в динамике галактик. Обычно эту зависимость пытаются получить, делая произвольные допущения, например, о том, что поверхностная светимость галактик остается постоянной с ростом радиуса галактики. Но есть и более радикальные подходы, которые предполагают отказ от теории гравитации Ньютона-Эйнштейна: например, израильский ученый М. Милгром создал модифицированную теорию тяготения (теорию МОНД), где ввел феноменологический гравитационный потенциал на краю галактики, обеспечивающий выполнение закона Талли-Фишера. Эта наблюдаемая зависимость оказалась столь важной, что легла в основу МОНД - новой теории гравитации!

Что может сказать о зависимости Талли-Фишера в рамках циклической модели Вселенной? Мы полагаем, что эта зависимость может быть объяснена в рамках классической теории гравитации. Для этого нужно правильно учесть роль окружающей среды в аккреционной модели формирования галактик вокруг сверхмассивных черных дыр.

Закон Талли-Фишера связывает массы галактик с их периферийной (асимптотической) скоростью вращения. Логично предположить, что закономерность Талли-Фишера может быть обусловлена граничными условиями. При аккреционном росте дисковой (спиральной или линзовидной) галактики с массой M , двигающейся в среде межгалактического газа, максимальный размер галактики R должен быть равен радиусу сферы тяготения, на границе которой гравитационное притяжение галактики становится равным внешней возмущающей силе f , вызванной, например, гравитационным воздействием соседних галактик или межгалактических облаков (Рой, 1978). Это условие достаточного притяжения на краю любой гравитирующей системы – от галактического балджа до тонкого диска вокруг черной дыры:

$$\frac{GM}{R^2} = f \tag{6}$$

Можно предположить, что внешняя сила f была приблизительно одинакова для всех галактик, формирующихся на раннем этапе эволюции Вселенной. Величина гравитационной силы на краю нашей Галактики равна $\frac{GM}{R^2} \sim 2 * 10^{-8} \text{ см/с}^2$ для $M=10^{12} M_{\odot}$ и $R=10^5$ св. лет.

Скорость кругового движения V для звезд на краю галактики можно найти из выражения (5). Подставляя R из (5) в уравнение (6), получим:

$$M = \frac{V^4}{Gf} \quad (7)$$

Соотношение (7) просто и логично объясняет загадочную знаменитую зависимость Галли-Фишера между массой галактик и периферийной скоростью их вращения.

Рассмотрим детальнее природу внешней силы f . Наиболее реальным источником такой внешней возмущающей силы являются гравитационное воздействие от облаков Джинса с массой $10^5 M_{\odot}$, которые еще не вошли в состав галактики и принадлежат окружающей среде:

$$f = \frac{Gm}{d^2} \sim 10^{-8} \text{ см/с}^2, \quad (8)$$

где d – минимальное расстояние между облаком (или звездой) на краю галактики и межгалактическим облаком. Для оценки (8) было принято, что $d=25$ св. лет, что примерно равно радиусу облака Джинса (см. Приложение II). Таким образом, оценки современного гравитационного ускорения на краю галактик и гравитационного возмущения от облаков Джинса на ранних этапах формирования галактик (8) хорошо совпадают. Так как концентрация облаков Джинса в начальный момент была одинакова во всей Вселенной, то для всех растущих галактик будет одинаковым, как расстояние d , так и возмущающая сила f .

Воздействие облаков на растущие галактики было максимально в эпоху формирования галактик, когда плотность среды была на много порядков больше. Позже концентрация межгалактических облаков упала из-за расширения Вселенной и из-за захвата их в галактики. Но условие (7), которое выполнялось во время формирования галактик, осталось актуальным для тех галактик, которые не сливались и сохранили свою массу и размер.

Концентрация межгалактических облаков увеличивается в скоплениях галактик, что обеспечивает повышенную внешнюю силу f . Выражения (7) и (8) устанавливают связь между скоростью вращения галактик и внешней силой: $V \propto f^{1/4} \propto d^{-1/2}$. Вероятно, этим и объясняется, что линзовидные галактики, тяготеющие к центрам скоплений, где расстояние d между облаками было меньше, вращаются быстрее спиральных.

В 1976 году С. Фабер и Р. Джексон открыли аналогичную (7) зависимость для эллиптических галактик. Очевидно, что обсуждаемый механизм связи массы галактики и скорости периферийного движения должен работать не только для круговых, но и для других типов орбит. Звезды в эллиптической галактике двигаются по орбитам с большим эксцентриситетом, тем не менее, на краю галактики они будут испытывать аналогичное гравитационное возмущение f от межгалактических облаков, то есть, подчиняться условию (6). Отличие только в том, что для вычисления скорости движения тел в эллиптических галактиках нужно использовать не условие кругового движения (5), а теорему вириала:

$$\sigma^2 = \frac{1}{5} \frac{GM}{R} \quad (9)$$

где σ – одномерная дисперсия скоростей, что приводит к финальному выражению закона Фабера-Джексона:

$$M = 25 \frac{\sigma^4}{Gf} \quad (10)$$

Таким образом, гравитационные возмущения от облаков Джинса на краю галактик в эпоху их формирования вокруг сверхмассивных черных дыр являются механизмом, объясняющим соотношения, как Талли-Фишера, так и Фабера-Джексона.

Еще более загадочной закономерностью является так называемое $M - \sigma$ или «М-сигма» соотношение. Масса центральной сверхмассивной черной дыры M_0 обычно составляет малую часть ($\sim 0.1\%$) от массы балджа (центральной части дисковой галактики). Тем не менее, существует высокая корреляция между массой локальной SMBH и таким глобальным параметром, как дисперсия звездных скоростей в балдже. Отметим, что орбиты звезд в галактическом балдже имеют большой эксцентриситет, сопоставимый с эксцентриситетом орбит светил в эллиптических галактиках. М-сигма соотношение

между массой SMBH и дисперсией скоростей $M_0 \propto \sigma^4$ близко к зависимости (10).

Статистическое M-сигма соотношение, полученное для галактической популяции, означает, что SMBH находятся в центре каждой галактики и играют важную роль в их формировании. Но не существует убедительных моделей, которые бы смогли связать черную дыру, масса которой незначительна в масштабе галактики, с таким параметром, как средняя дисперсия скоростей в массивном балдже. Особенно трудно объяснить M-сигма соотношение в рамках моделей, которые предполагают рост SMBH уже после образования галактик: такие модели не могут объяснить слишком быстрый рост центральных дыр, а также противоречат факту существования маленьких галактик с огромными SMBH. Например, уже обнаружены карликовые галактики с SMBH, масса которых достигает половины массы балджа.

Рассмотрим M-сигма соотношение в рамках аккреционной теории образования галактик. Из условия (6) следует, что площадь галактического диска пропорциональна его массе: $\pi R^2 \propto M$. Аккреционный рост галактики прямо зависит от площади ее диска, а, следовательно, и от ее массы:

$$\frac{dM}{dt} \propto \pi R^2 \propto M \quad (11)$$

Уравнение (11) приводит к экспоненциальному закону роста галактики $M = M_0 \exp(\gamma t)$, где γ – постоянная (инкремент роста). Можно ожидать, что соотношение (6) выполнялось и в самом начале роста галактического диска, когда основная масса зародыша галактики содержалась в SMBH. Таким образом, под массой M_0 можно понимать массу центральной SMBH. Следовательно, уравнение (11) и его решение связывают массу центральной дыры с массой окружающего ее балджа. Учитывая (11), мы получаем обоснование M-sigma relation: связи массы SMBH и одномерной дисперсии хаотических скоростей в балдже:

$$M \propto M_0 \propto \sigma^4 \quad (12)$$

Более детальные вычисления для M-сигма соотношения приведены в Приложении II.

Таким образом, труднообъяснимая M-сигма зависимость легко получилась для модели циклической Вселенной с популяцией реликтовых сверхмассивных черных дыр, вокруг

которых формируются галактики. Способность циклической космологической модели решать застарелые проблемы галактической динамики является весомым аргументом в пользу периодической Вселенной.

Обилие SMBH на ранних стадиях Вселенной до сих пор загадка (Bischetti et al., 2022). Запущенный в конце декабря 2021 года Вебб-телескоп начинает изучать самые ранние эпохи Вселенной, когда образовывались первые галактики и звезды. Можно надеяться, что скоро мы получим ответ на вопрос: существовали ли уже тогда сверхмассивные черные дыры, которые стали затравками образования галактик?

16. Анизотропия Вселенной

*Однако следует подчеркнуть, что этот вывод в настоящее время не представляется надежным. Используя разные выборки данных и/или разные методы анализа, люди получали совершенно разные результаты...
В. Жао, Л. Сантос (2016)*

Изотропная и однородная космологическая модель является настолько общепринятой парадигмой, что вызывает удивление обилие исследований, которые обнаруживают признаки глобальной анизотропии Вселенной. Эти работы дают результаты с большим разбросом, вплоть до противоположных вариантов, тем не менее, общий вектор выводов вырисовывается вполне убедительным. Вектор – это не в переносном смысле, а в буквальном, потому что многие исследования, не сговариваясь, указывают на определенную область неба. Детальный анализ этих исследований требует отдельной монографии, поэтому в нашей книге мы остановимся только на наиболее надежных, с нашей точки зрения, работах.

16.1 Глобальная анизотропия постоянной Хаббла

Экспериментаторы всегда переоценивают точность своих данных и склонны совершать

ошибки, поэтому не стоит сразу реагировать на их сообщения.
П.А.М. Дирак (1981)

Изотропия распределения реликтового излучения, открытого Пензиасом и Вильсоном в 1965 году, стала сильным подтверждением изотропной модели Вселенной. Но одновременно этот эффект вызвал активные поиски анизотропии реликтового фона электромагнитного излучения (то есть определение степени его изотропии), как и признаков анизотропии в распределениях других космических объектов (квазаров, галактик и их скоплений). Отметим, движение Земли и Млечного Пути относительно реликтового излучения определяет очевидную анизотропию дипольного типа (на уровне $\sim 10^{-3}$) из-за смещения Доплера. Эта физически прозрачная анизотропия маскирует возможные и более интересные дипольные эффекты, связанные с глобальной анизотропией Вселенной.

Поиски мелкомасштабной анизотропии реликтового излучения увенчались успехом: она была открыта на уровне $\sim 10^{-5}$ в данных спутников «COBE» и «Реликт» в начале 90-х годов, и с тех пор активно изучается, например, по данным спутников WMAP и Planck. Такая мелкомасштабная анизотропия не имеет отношения к глобальной космологической анизотропии, которая, исходя из общих соображений, должна иметь, в первую очередь, дипольный или квадрупольный характер. Интересно, что именно величина наблюдаемого квадрупольного момента реликтового излучения представляет проблему для теории инфляции.

Целый ряд работ выявили в наблюдательных данных глобальную анизотропию распределения различных космических объектов или их свойств. Рассмотрение этих работ выходит за рамки задач данной книги. Мы ограничимся описанием интересного исследования, которое показало, что распределение постоянной Хаббла по небу имеет отчетливую квадрупольную анизотропию.

В 2020 году группа исследователей из Германии и США во главе с К. Мигкасом опубликовала статистическое исследование многих сотен скоплений галактик. Кластеры галактик наблюдались в рентгеновском диапазоне, и для каждого скопления были определены температура, светимость и

расстояние до него. Это удалось благодаря корреляции, которая существует для рентгеновской светимости и температуры газа в скоплениях. Существенным оказалось и то, что скопления галактик хорошо наблюдаются во всех направлениях, поэтому они достаточно равномерно покрывают небо (за исключением полосы вдоль галактической плоскости), в то время как такие «космические маяки», как сверхновые, распределены гораздо неравномерней.

Исследование Миггаса и соавторов позволило надежно определить постоянную Хаббла или скорость расширения Вселенной в конкретном направлении. Как оказалось, расширение Вселенной является анизотропным, имея квадрупольную составляющую около 15% (иллюстрация 15). Карта неба на цветной иллюстрации 15 дана в галактических координатах (то есть Млечный Путь расположен вдоль горизонтальной оси). Обратим внимание на темную область минимальной постоянной Хаббла в районе отрицательных галактических широт -20° и долгот $\sim 280^\circ$ (на рисунке 0° для левой части шкалы равен одновременно и 360° для правой части). Самая холодная часть этого пятна близка к Южному полюсу, который имеет галактическую широту -27.1° и долготу 302.9° .

Как показано в Приложении II, степень анизотропии, найденная Миггасом и соавторами, хорошо соответствует теоретическим расчетам в рамках циклической космологии, где первое приближение соответствует изотропии и однородности, а второе приближение дает анизотропию до 15%. Отметим, что ориентация анизотропии постоянной Хаббла также близка к анизотропии направления осей галактик, которая обсуждалась в разделе 15.2.

Это исследование Миггаса и др. (2020) – одно из самых значимых среди множества других работ, которые, исследуя самые различные космические объекты и их свойства, обнаруживают заметные признаки глобальной анизотропии Вселенной.

16.2 Есть ли у Вселенной центр, на который указывает «дьявольская ось»?

*Теория, утверждающая, что истина очевидна и каждый, кто хочет, может ее увидеть, лежит в основе почти всех разновидностей фанатизма... Истина, как правило, вовсе не очевидна.
Карл Поппер (1963)*

Принцип Коперника можно сформулировать в виде утверждения, что ни Земля, ни Солнце не занимают во Вселенной выделенного положения. Но этот принцип часто пытаются расширить в попытке использовать авторитет Коперника для поддержки своих теорий. Например, Бонди и Голд пытались обосновать с его помощью теорию стационарной Вселенной, которая предполагала, что наше время ничем не выделено, и что Вселенная в любой момент должна выглядеть одинаково. Открытие Пензиаса и Вильсона, что Вселенная была раньше гораздо горячее, разрушили модели стационарной Вселенной и предположения об ее однородности во времени. Сейчас, с помощью принципа Коперника, пытаются обосновать однородность Вселенной в пространстве. Когда заходит вопрос о центре Вселенной, то часто кивают на принцип Коперника, как на запрещающий какие-либо глобальные неоднородности Вселенной. Легко заметить, что это неправомерное расширение оригинального принципа Коперника. Ведь все структуры космоса имеют центр: Земля, Солнечная система, наша Галактика и другие галактики, а также скопления галактик. Почему же при переходе от скопления галактик ко всей Вселенной появляется запрет на наличие центра? Это ограничение выглядит искусственным.

В циклической модели центр Вселенной существует: именно к этой области стягивается коллапсирующее поле галактик, так что этот центр можно определить, как центр инерции всех галактик. Именно в этой области возникает Большая Черная Дыра, которая имеет, видимо, начальный размер порядка светового года, так что этот размер можно считать точностью, с которой можно определить центр Вселенной,

который одновременно является и центром стационарной Мегадыры.

Как наличие этого центра Вселенной согласуется с ее изотропией и однородностью? Как показывают решения уравнений Эйнштейна (см. Приложение II), изотропия и однородность характерны для достаточно ограниченной области Вселенной. Анизотропия и неоднородность выступает в данном случае лишь небольшими поправками к обычному уравнению Фридмана. Будучи локальными наблюдателями, мы можем детально наблюдать лишь достаточно близкое космическое окружение, поэтому анизотропия и неоднородность долго ускользали от внимания наблюдателей – и лишь в последнее время ситуация стала кардинально меняться.

Почему мы не видим этого центра мира на нашем небе? На самом деле, вероятно, мы его видим, но пока не осознаем этого. Возможно, что именно область аномально низкой постоянной Хаббла (см. иллюстрацию 15) указывает на центр Вселенной.

Когда ученые стали изучать данные спутников *WMAP* и *Planck* по реликтовому излучению, то сначала учли кинематический диполь, который соответствует движению Земли относительно фонового излучения со скоростью около 630 км/сек. Точка, куда направлен этот диполь (то есть, куда движется Земля, если этот диполь имеет сугубо доплеровскую природу) имеет галактическую широту 48° и долготу 264° . Все остальные флуктуации микроволнового излучения должны были представлять случайные отклонения от среднего. Но неожиданно выяснилось, что ориентация квадрупольной (широта 13.4° и долгота 238.5°) и октупольной (широта 25.7° и долгота 239.0°) компоненты флуктуаций реликтового излучения почти совпадают между собой, и обе близки к ориентации диполя.

Космологи Кэти Лэнд и Жуан Магейжу (Land and Magueijo), в своей статье 2005 года ввели в обиход термин «дьявольская ось», вдоль которой выстраиваются эти крупномасштабные компоненты реликтового излучения. Этот термин отражает степень изумления, которые испытывают ученые, выросшие в парадигме изотропной космологии, когда они сталкиваются с фактами анизотропии реальной Вселенной.

С точки зрения циклической космологии, появление этой оси естественно и связано с глобальной анизотропией Вселенной, которая имеет более сложный характер, чем доплеровский диполь, и может проявляться, как в дипольной, так и в квадрупольно-октупольных компонентах. Если вычесть из этой сложной анизотропии простой доплеровский диполь, то дипольную компоненту можно скомпенсировать, но все равно останутся самосогласованные и одинаково ориентированные квадрупольные и октупольные компоненты.

Доплеровский диполь, найденный по реликтовому излучению, должен быть универсальным: ведь он задан движением Земли, которая движется сквозь космическую среду, следовательно, он должен быть одинаков для всех объектов этой среды. Но диполь, который был определен по наблюдениям более чем миллиона квазаров, оказался по направлению (галактическая широта 28.8° и долгота 238.2°) заметно смещен от диполя, найденного по реликтовому излучению, а по амплитуде - в два раза больше, чем этот кинематический диполь - см. работу Secrest et al. (2021) и ссылки в ней на предыдущие исследования. Дальнейшие исследования должны выяснить, какая часть наблюдаемого диполя связана с движением Земли, а какая зависит от глобальной космологической анизотропии.

Целый ряд космических феноменов также указывают на область неба, близкую к «дьявольской оси». В обзоре В. Жао и Л. Сантос, опубликованном в 2016, обсуждаются эти проявления анизотропии. В частности, кроме совпадения осей низких мультиполей, рассматриваются анизотропия поляризации излучения квазаров, анизотропия вращения спиральных галактик, а также анизотропия ускорения расширения Вселенной, определяемая по взрывам сверхновых.

Нужно с осторожностью относиться к этим данным, полученным разными методами с различным уровнем достоверности (эпиграф к данному разделу взят как раз из обзора Жао и Сантос), но нельзя не отметить, что эти работы в сумме представляют серьезные аргументы в пользу анизотропии Вселенной. Как мы увидим в следующем разделе, эти аргументы дополняются данными и о пространственной неоднородности Вселенной.

17. Непостоянство постоянной Хаббла

*Критерием научного статуса теории является ее фальсифицируемость, опровержимость, или проверяемость.
Карл Поппер (1963)*

Анизотропия и неоднородность – две стороны одной медали. Если Вселенная анизотропна с точки зрения земного наблюдателя, то она будет одновременно и неоднородной. Разница лишь в том, что анизотропия измеряется в шкале наблюдаемых углов, а неоднородность может измеряться вдоль радиуса, взятого в какой-то конкретной части неба. Как показывают недавние работы, существуют очень серьезные факты, свидетельствующие в пользу глобальной неоднородности Вселенной, и один из этих фактов – неоднородность постоянной Хаббла, основного параметра космологических моделей.

17.1 Постоянная Хаббла вдали и вблизи

*Я хотел провести различие между наукой и псевдонаукой, прекрасно зная, что наука часто ошибается, и что псевдонаука может случайно натолкнуться на истину.
Карл Поппер (1972)*

В закон Хаббла-Леметра $V = H * R$, по которому можно вычислить скорость убегания V от нас любой галактики с известным расстоянием R , входит постоянная Хаббла H . Из анализа реликтового излучения, сделанного по данным спутника *Planck*, была найдена величина постоянной Хаббла: $H = 67.4 \pm 0.5 \text{ км с}^{-1}\text{Мпс}^{-1}$. Из этой величины следует, что галактики, разделенные расстоянием в один мегапарсек (то есть 3.26 миллиона световых лет), разбегаются со скоростями 67.4 км/сек.

Это измеренное значение постоянной Хаббла относится к периоду образования реликтового излучения, так что это оценка той постоянной Хаббла, которая была 380 тысяч лет спустя Большого взрыва.

Адам Рисс, получивший Нобелевскую премию за открытие ускоренного расширения Вселенной, активно занимается измерением постоянной Хаббла по наблюдениям цефеид и сверхновых. Результаты Рисса и его соавторов указывают на то, что постоянная Хаббла равна $73.2 \pm 1.3 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпс}^{-1}$. Это измерение получено не анализом фонового излучения, а методом, который основан на измерении расстояний до цефеид и сверхновых, то есть, это измерение современной постоянной Хаббла, основанное на достаточно близких объектах.

Цефеиды – это пульсирующие звезды, период пульсаций которых растет с реальной светимостью, поэтому они могут служить космическими маяками для определения расстояния. Светимость сверхновых звезд определяется по различной динамике вспышек. Чем ярче вспыхивает сверхновая, тем медленнее падает ее светимость после вспышки. По скорости падения этой светимости удается определить реальную светимость сверхновой в момент взрыва и, соответственно, расстояние до нее. Группой Рисса были вычислены расстояния до 2400 цефеид и 300 сверхновых в 19 галактиках. Расстояние до ближайших цефеид было откалибровано методом параллакса. В анализе использовались данные астрометрической обсерватории *Гайя*, которая была запущена в 2013 году Европейским космическим агентством и изучила положение и светимость более миллиарда звезд.

Группа Рисса измерила постоянную Хаббла тремя различными способами, используя цефеиды и сверхновые, которые располагаются сравнительно недалеко от нас по космологическим масштабам. Статистическая значимость разницы измерений группы Рисса и величины постоянной Хаббла, определенной по реликтовому излучению и относящейся к ранней Вселенной, достигает 4-5 сигма, что означает надежно установленный факт (в науке, как правило, разница между двумя значениями считается достоверной, если она достигает трех сигма или среднеквадратичных отклонений).

Если постоянная Хаббла меняется в зависимости от расстояния почти на 10%, то это означает, что Вселенная неоднородна. В совокупности с данными об анизотропии, это ставит под сомнение все простые космологические модели, основанные на изотропии и однородности.

17.2 Подрыв основ современной феноменологической космологии

Это не просто разные результаты двух экспериментов. Мы наткнулись на нечто принципиально различное. В первом случае у нас имеется измерение того, насколько быстро расширяется наблюдаемая Вселенная. Во втором — предсказание, основанное на физике ранней Вселенной и наблюдений о том, как быстро она должна расширяться. И, так как полученные значения не совпадают, возникает очень большая вероятность того, что мы что-то упускаем в космологической модели, которая связывает две эпохи.

Адам Рисс (2019)

Космология Фридмана базируется на простейшем предположении об однородности и изотропии Вселенной. Теория инфляции встраивалась в космологию Фридмана, задавая в ней нужные параметры в рамках каких-то гипотез, но сохраняя постоянство «космологической постоянной» (извините за тавтологию) по всему пространству Вселенной. Постоянная Хаббла, которая задает темп расширения Вселенной, должна быть постоянной во всех точках пространства в данный момент времени, хотя и скорость расширения Вселенной, и постоянная Хаббла меняются со временем. Переменность во времени расширения Вселенной описывается «параметром Хаббла».

Как мы видели в предыдущих параграфах, постоянная Хаббла меняется по небу по квадрупольной моде с амплитудой в 15% (иллюстрация 15), и падает с расстоянием на ~10%, что ставит под вопрос и постоянство «космологической

постоянной». Если этот фундаментальный параметр космологических моделей не является постоянным, то это разрушает не только теорию инфляции, но и всю космологию, основанную на уравнениях Фридмана 1922 года. Значит, эти уравнения должны быть модифицированы, обобщены на случай анизотропной и неоднородной Вселенной. Это не теоретическая идея, которая возникла на поле космологии среди сотен других идей, а вывод из наблюдательных данных, которые указывают на то, что модель изотропной и однородной Вселенной неполна и противоречит ряду надежно установленных фактов. Отметим, что анизотропные вселенные Бианки не подходят на роль такой обобщенной космологии из-за упрощающего предположения об их однородности.

Tiwari et al. (2022) в статье в одном из ведущих астрофизических журналов показали, что крупномасштабные возмущения («моды супергоризонта») могут объяснить «напряжение» в измерениях постоянной Хаббла, а также целый ряд анизотропных феноменов: аномалии квадруполь-октуполь реликтового излучения; поляризации излучения квазаров и других, связанных с «дьявольской осью». Нетрудно заметить, что Tiwari et al. (2022) записывают такое же уравнение для возмущения метрики, которое использовали Горькавый и Васильков в статье 2018 года (см. уравнение (23) в Приложении II). Разница лишь в том, что Горькавый и Васильков используют возмущение от растущей черной дыры, а Tiwari с соавторами берут обычную синусоиду. Можно сделать вывод, что работа Tiwari с соавторами подтверждает перспективность объяснения многочисленных анизотропных эффектов в рамках циклической космологии, где присутствует возмущающее воздействие от растущей черной дыры.

Джеймс Кресуэл и Павел Насельский выдвинули интересную гипотезу, что вокруг «дьявольской оси» существует перпендикулярная зона (или кольцо), в которой концентрируются такие феномены как Холодное Пятно Эридана в реликтовом излучении. Можно выдвинуть схожую гипотезу, только со смещением на 90 градусов: предположить, что направление на центр Вселенной близко к положению Южного полюса на небе, там самым на кольцо, перпендикулярное этой

оси, попадут и Холодное Пятно, и ось дипольной компоненты реликтового излучения (как и оси других мультиполей).

В нашем обсуждении мы не затронули многие другие исследования, указывающие на анизотропию и неоднородность нашего мира, в частности:

- вопрос о возможном вращении Вселенной, чему было посвящено немало работ Веры Рубин с соавторами;

- «дипольный репеллер» – точка на небе, от которой галактики словно отталкиваются;

- «темный поток», который демонстрирует анизотропию Вселенной, как минимум, на локальном уровне.

Задача по сведению в единую картину всех многочисленных данных по глобальной анизотропии и неоднородности Вселенной сложна, но разрешима в рамках циклической космологической модели, учитывающей принципиальную анизотропию и неоднородность нашего мира.

18. Реликтовые нейтронные звезды

Несомненно, существуют люди, не обладающие предрасположением считать существенными вещи, отличающиеся постоянством; но таких людей помещают в сумасшедший дом.

А. С. Эддингтон

18.1 Самые прочные звезды Вселенной

Нейтронные звезды возникают при взрыве сверхновых; по оценкам, в Галактике должна существовать одна нейтронная звезда на тысячу обычных звезд. Так как нейтронные звезды образуются при взрывном сжатии ядер обычных звезд, которые имеют значительный угловой момент, то сокращение радиуса вращающегося остатка звезды приводит к очень высоким скоростям вращения, вплоть до 700 оборотов в секунду. В Млечном Пути открыто несколько тысяч нейтронных звезд, 90% из них – одиночные, а 10% входят в двойные системы. Нейтронные звезды движутся с высокими скоростями в сотни

километров в секунду; значительная их часть обнаруживается в галактическом гало, где они входят в состав шаровых скоплений.

Нейтронные звезды похожи на огромные атомные ядра, радиусом 10-20 километров и массой в полторы-две массы Солнца. Они представляют собой шар из нейтронов, в несколько раз более плотный, чем атомные ядра, и на поверхности которого есть тонкая (около километра) кора из ядер тяжелых атомов и электронов. Над корой простирается тонкая – толщиной от миллиметров до десятков сантиметров атмосфера, в которой формируется тепловое свечение звезды. Скорость убегания с поверхности нейтронной звезды достигает половины скорости света. Если какое-то вещество падает на такую звезду, то разгоняется до субсветовых скоростей, из-за чего ядра атомов падающего вещества разрушаются при ударе о поверхность и превращаются в нейтроны, присоединяясь к звезде.

Часть нейтронных звезд наблюдаются в виде пульсаров, которые поделены на несколько типов, излучающих в разных диапазонах частот. Магнитное поле на поверхности пульсаров превосходит магнитное поле Земли в триллионы раз. Магнитное поле привязано к пульсару и вращается вместе с ним. На определенном расстоянии от нейтронной звезды, скорость движения магнитного поля приближается к световой. Магнитное поле не может двигаться быстрее скорости света, поэтому в этой области линии магнитного поля обрываются. В местах таких обрывов наружу вырываются частицы, которые излучают в радиодиапазоне. Такие объекты называют радиопульсарами – именно их первыми среди пульсаров открыла Джоселин Белл. Распределение радиопульсаров по скоростям собственных вращений демонстрирует два отчетливых пика, соответствующие двум классам пульсаров, с типичными периодами вращения в 0.6 сек, и менее 0.004 сек.

В двойной системе вокруг нейтронной звезды часто формируется аккреционный диск из материала, перетекающего из второй звезды. Если скорость вращения звезды не слишком большая, то вещество из диска может проникать по магнитным линиям в район полюса нейтронной звезды. Размер зоны падения вещества составляет всего сотню метров, но это площадка разогрета так, что излучает рентгеновские лучи, которые

регистрируются даже на Земле. Такие объекты называются рентгеновскими пульсарами.

Нейтронные звезды, как и атомные ядра, прочно связаны ядерными силами. Но, как показывают оценки в статье Горькавого и Тюльбашева (2021), для нейтронных звезд еще более важным является гравитационная энергия связи, которая на порядок превосходит энергию связи нуклонов в самых прочных ядрах. Максимальная энергия связи на нуклон в ядре железа составляет около 10 Мэв. Легко показать, что мощное тяготение нейтронной звезды приводит к энергии гравитационной связи примерно 100 Мэв на нуклон. Следовательно, нейтронная звезда менее подвержена фотодиссоциации и может уцелеть в горячей среде сжатой Вселенной. Отметим, что энергия гравитационной связи для белых карликов на 2 – 3 порядка меньше, чем у нейтронных звезд, тем самым белые карлики должны подвергаться фотодиссоциации примерно с той же интенсивностью, что и обычные звезды.

18.2 Наблюдательные признаки реликтовых нейтронных звезд

В статье Горькавого и Тюльбашева (2021) было сделано предсказание о существовании реликтовых нейтронных звездах (РНЗ), которые, благодаря своей прочности, могут выдержать сжатие Вселенной. Это означает, что нейтронные звезды тоже могут быть реликтами предыдущих космологических циклов и вносить свой вклад в темную материю. Если черные дыры никогда не могут уменьшать свою массу, то нейтронные звезды могут «таять» из-за фотодиссоциации на максвелловском хвосте распределения гамма-квантов и уходить в область малых масс, минимально разрешенных для нейтронных звезд (Горькавый и Тюльбашев, 2021). Так как нейтронные звезды могут также расти в результате аккреции окружающих барионов, то для понимания эволюции их масс нужно строить детальные модели.

Видный немецкий астроном Р. Киппенхан в 1987 году утверждал: «В настоящее время уже известно такое количество пульсаров, что можно предположить существование в одной только нашей галактике около миллиона активно действующих пульсаров. С другой стороны, несколько последних десятилетий

ведутся наблюдения удаленных галактик с целью установить, какое количество взрывов сверхновых происходит в среднем за столетие. Это позволяет сделать вывод о том, сколько нейтронных звезд возникло с древнейших времен в нашем Млечном Пути. Оказывается, что число пульсаров значительно превосходит то количество нейтронных звезд, которое могло образоваться в результате взрывов сверхновых. Значит ли это, что пульсары могут возникать и иным путем? Быть может, некоторые пульсары образуются не в результате взрывов звезд, а в ходе менее эффектных, но более упорядоченных и мирных процессов?»

Астрономами были предложены несколько решений проблемы избытка пульсаров, которые могут компенсировать расхождение между наблюдаемым количеством и теоретически ожидаемым числом нейтронных звезд. Но если наблюдаемое количество пульсаров и нейтронных звезд все-таки действительно больше теоретически ожидаемого, то гипотеза возможного сохранения части нейтронных звезд от прошлого цикла Вселенной решает эту проблему без привлечения новых механизмов образования пульсаров.

В статье Горькавого и Тюльбашева (2021) перечислены возможные признаки реликтовых нейтронных звезд (РНЗ), которые отличают их от нейтронных звезд, возникших в текущем цикле Вселенной. В частности, одиночные РНЗ должны двигаться со значительными скоростями и располагаться в сферическом гало галактики. Обнаружение статистически значимого избытка нейтронных звезд на больших галактических широтах даст дополнительные косвенные доказательства в пользу гипотезы о существовании РНЗ. Температура поверхности и напряженность магнитного поля у РНЗ в целом будет ниже, чем у обычных нейтронных звезд, а периоды вращения — больше. Так как большая часть этих звезд не является пульсарами, то невозможно обнаружить РНЗ классическими способами через поиск их периодического излучения. Наиболее очевидный путь — это поиск их чернотельного излучения, например, в данных по компактным рентгеновским источникам с неизменяющейся плотностью потока. В силу малой поверхности РНЗ их светимость мала, поэтому для обнаружения нужны инструменты с очень высокой

чувствительностью. Чернотельное излучение РНЗ, если его удастся зарегистрировать, должно характеризоваться тем, что его максимум будет, скорее всего, в оптическом диапазоне. Если РНЗ входят в тесные двойные системы, то, вследствие аккреции на поверхность нейтронной звезды, она может превратиться в рентгеновский пульсар. Масса такого пульсара может быть аномально маленькой, если реликтовые нейтронные звезды теряют массу при прохождении этапа сжатой Вселенной.

Отметим, что важным следствием присутствия нейтронных звезд в сжатой Вселенной является образование черных дыр, возникающих при слиянии нейтронных звезд. Этот сценарий формирования черных дыр был подтвержден регистрацией гравитационных волн с помощью детектора LIGO. Эти наблюдения скоро дадут надежную оценку числа нейтронных звезд во Вселенной.

19. Черные дыры и предсказание реликтовых гравитационных волн

События, которые произошли до большого взрыва, не могут иметь никаких последствий, касающихся нас, и поэтому не должны фигурировать в научной модели Вселенной. Следовательно, нужно исключить их из модели и считать началом отсчета времени момент большого взрыва.

Стивен Хокинг (1990)

Хокинг считал, что ничто до Большого взрыва не может повлиять на нас. Мы полагаем, что он ошибался: история Вселенной до Большого взрыва имеет важное значение для нашего космологического цикла, и реликты прошлых циклов в изобилии рассеяны вокруг. И главными реликтовыми объектами являются массивные черные дыры.

19.1 Распределение черных дыр по массам

***Проблема, что было до сингулярности (и было ли это «до»), даже не упоминалась на нашем симпозиуме. Это не значит, что этой проблемы нет!
Я.Б. Зельдович (1978)***

Черные дыры звездных масс (SBH) доминируют в популяции черных дыр (BH) по суммарной массе, и их слияния, вызывающие гравитационные волны, регистрируются гравитационными антеннами LIGO. Сверхмассивные черные дыры (SMBH), лидирующие по индивидуальной массе, обнаруживаются в центрах любых галактик. Черные дыры промежуточных масс (IMBH) встречаются крайне редко, несмотря на активные поиски. Хорошо изучен и наблюдательно подтвержден только классический механизм образования дыр в результате эволюции массивных звезд и взрывов сверхновых. Но этот механизм не может объяснить обилие черных дыр звездных масс, обнаруженных LIGO. Образование сверхмассивных дыр, найденных астрономами на самых ранних стадиях Вселенной, также трудно объяснить аккрецией окружающего вещества. Может модель циклической Вселенной объяснить наблюдаемые свойства популяции черных дыр без дополнительных гипотез?

Если не рассматривать квантовое испарение, которое несущественно для дыр звездных масс, то черные дыры являются неразрушимыми объектами, способными уцелеть при максимальном сжатии Вселенной – только если они не сольются друг с другом, что сохраняет неразрушаемость черных дыр как популяции.

В разделе 12.1 была рассмотрена модель накопления черных дыр в циклической Вселенной. Горькавый и Тюльбашев (2021) показали, что без учета слияний, всю наблюдаемую популяцию черных дыр, благодаря их компактности, можно разместить в сфере с диаметром около светового года. Рост черных дыр пропорционален их площади поверхности, то есть радиусу (и массе) в квадрате. Уменьшение числа черных дыр связано с их поглощением более крупными дырами. Эти процессы можно описать несложными уравнениями. В работе Горькавого и Тюльбашева (2021) рассчитано несколько моделей

на основе итерационных формул (43)-(46) из Приложения II. На рис.6 показаны результаты для Модели 1 из статьи Горькавого и Тюльбашева (2021). Данные для Моделей 1 и 4 из этой статьи приведены в Таб. III (см. также Приложение II).

Таблица III. Популяция черных дыр в двух моделях циклической Вселенной.

<i>Параметры</i>	<i>Модель 1</i>	<i>Модель 4</i>
Доля уменьшения числа дыр за цикл (в %), D	5%	2%
Параметр роста массы дыры за цикл, C (в $1/M_{\odot}$)	$5 * 10^{-4}$	$2 * 10^{-4}$
Максимальное число циклов в модели, t_{max}	401.41	1002.33
Циклы с массой растущих дыр меньше $100 M_{\odot}$	1-382	1-953
Суммарное число черных дыр SBH ($<100 M_{\odot}$), N_{SBH}	$1.9 * 10^{22}$	$4.9 * 10^{22}$
Суммарное число черных дыр IMBH, N_{IMBH}	$4.5 * 10^{13}$	$1.4 * 10^{14}$
Суммарное число черных дыр SMBH, N_{SMBH}	$2.6 * 10^{10}$	$8.2 * 10^{10}$
Суммарная масса черных дыр SBH, M_{SBH} (в M_{\odot})	$1.0 * 10^{23}$	$2.6 * 10^{23}$
Суммарная масса черных дыр IMBH, M_{IMBH} (в M_{\odot})	$2.1 * 10^{16}$	$6.7 * 10^{16}$
Суммарная масса черных дыр SMBH, M_{SMBH} (в M_{\odot})	$3.1 * 10^{16}$	$9.5 * 10^{16}$

Начальное количество черных дыр в модели было принято в $n_0 = 10^{21}$ с индивидуальными начальными массами $m_0 = 5 M_{\odot}$ (отметим, что приведенные в таблице III суммарные численность и масса популяции линейно зависят от заданного n_0 , поэтому они легко пересчитываются для другого начального значения n_0). Параметр D означает долю, на которую количество черных дыр уменьшается из-за слияний с более крупными дырами в течение одного космологического цикла. Параметр C характеризует скорость роста индивидуальных масс черных дыр

за цикл – см. формулы (44)-(45) Приложения II. Значения интегральной численности N и общей массы M черных дыр конкретных классов получены суммированием количества и масс черных дыр в рассматриваемой популяции. Например, численность SBH в шестой строчке таблицы была получена суммированием всех n_i для интервала масс SBH для 382 космологических циклов в Модели 1 и для 953 циклов в Модели 4. Численность IMBH получилась суммированием n_i для масс IMBH для последующих 19 циклов в Модели 1 и 49 циклов в Модели 2. Суммарная масса каждого класса считается аналогично.

Характерной особенностью рассчитанных моделей является быстрый рост индивидуальной массы черных дыр после достижения величины в сотню солнечных масс, то есть перехода их в класс IMBH. В свою очередь, SMBH растут так быстро, что возникают только на последнем цикле модели. Небольшое скачкообразное уменьшение количества черных дыр на последнем цикле на рис.6 связано с тем, что последний цикл формально не завершен.

Для обеих моделей средние значения массы SBH - $5.3 M_{\odot}$; IMBH – 480 солнечных масс; SMBH - $1.2 * 10^6$ масс Солнца. Данные простые расчеты показывают, что средняя масса черных дыр, вносящих максимальный вклад в массу Вселенной, должна быть близка к начальной массе черных дыр $m_0 = 5 M_{\odot}$, то есть основную массу темной материи должны составлять небольшие дыры звездных масс.

Согласно рассчитанным моделям, на одну SMBH в интервале масс $5 * 10^5 - 5 * 10^9 M_{\odot}$, расположенной в центре крупной галактики вроде Млечного Пути или Туманности Андромеды, приходится около сотни черных дыр с $5 * 10^3 - 5 * 10^5 M_{\odot}$, вокруг которых могут вырасти карликовые галактики и галактические спутники, а также $\sim 10^3$ черных дыр с массами $5 * 10^2 - 5 * 10^3 M_{\odot}$, которые могут располагаться в центрах ярких шаровых скоплений, и $\sim 10^{11-12}$ дыр с массой меньше $500 M_{\odot}$, которые могут отвечать за темную материю. Эти оценки численности черных дыр разных масс соответствуют количеству спутников Млечного Пути, а также числу шаровых скоплений в нашей Галактике и в Туманности Андромеды. Следовательно, модель эволюционного накопления черных дыр в циклической

Вселенной без каких-либо дополнительных предположений приводит к наблюдаемому распределению дыр, которые отвечают, как за темную материю, так и за образование галактик и шаровых скоплений. Основные выводы из модели, которые подтверждаются или могут быть подтверждены наблюдениями:

1. SBH, черные дыры звездных масс менее $100M_{\odot}$, накапливаясь в процессе многочисленных циклов, образуют популяцию, объясняющую наблюдения LIGO и отвечающую за феномен темной материи.

2. Сверхмассивные SMBH существуют на самых ранних стадиях расширения Вселенной и вносят важный вклад в образование квазаров и галактик, которые могут формироваться вокруг SMBH.

3. Популяция промежуточных IMBH потеряла свою коллективную численность и суммарную массу по сравнению с SBH в ходе многократных циклов. Зато IMBH стала прародительницей быстро растущих SMBH. Вероятно, IMBH отвечают за формирование звездных шаровых скоплений и образование спутников галактик.

Многие специалисты считают, что гипотеза о том, что темная материя целиком состоит из черных дыр и нейтронных звезд, находится в противоречии с наблюдательными данными по гравитационному линзированию звезд в Магеллановых облаках (см. обзор и ссылки в статьях Долгова, 2018 и Belotsky et al, 2019). Действительно, если вокруг Галактики равномерно распределены черные дыры или нейтронные звезды, то они должны часто загораживать обычные звезды соседних галактик, что вызывает кратковременные увеличения светимости этих звезд. Но гипотеза равномерности распределения черных дыр пока ничем не подтверждена. Типичными объектами галактического гало являются шаровые скопления звезд, которые возникают на ранних стадиях расширения Вселенной. Логично предположить, что реликтовые черные дыры тоже следуют такому сценарию и создают шаровые скопления, которые остаются темными и невидимыми, если в них нет достаточно крупной IMBH, захватывающей газ в количестве, достаточном для интенсивного звездообразования (см. рис. 10 и Приложение II).

Неустойчивость Джинса после эпохи рекомбинации создала в однородной Вселенной, вещество которой состояло из газа и черных дыр, множество облаков с массой $\sim 10^5 M_{\odot}$ и размером около 100 световых лет (см. Приложение II). Если воспользоваться данными модели 4 из таблицы III, то можно оценить число таких облаков Джинса во Вселенной в $\sim 10^{18}$. Из таблицы III следует, что в каждом облаке Джинса будет содержаться $(2 - 5) * 10^4$ черных дыр звездных масс (SBH). Фактически, облака Джинса, которые возникли при распаде однородной среды Вселенной, представляют собой скопления черных дыр с примесью газа. Из таблицы III следует, что лишь в одном из 10 тысяч облаков Джинса есть черная дыра промежуточной массы. Видимо, только скопление с «изюминкой» в виде ИМВН будет обладать достаточным количеством газа, чтобы превратиться в шаровое скопление с яркими звездами. Остальные скопления потеряют свой газ и останутся в статусе «темных шаровых скоплений» (рис.10).

На 10-100 миллионов облаков Джинса приходится одна сверхмассивная черная дыра. Она быстро соберет вокруг себя газовый диск и начнет ловить им соседние облака, став затравкой будущей галактики. Большая часть облаков Джинса, в ходе пролета сквозь галактический протодиск, отдадут ему свой газ и превратятся в темные шаровые скопления в гало галактики (рис.10).

Если черные дыры образуют скопления, то наблюдательное ограничение по количеству событий гравитационного линзирования, базирующееся на гипотезе равномерного распределения дыр, теряет силу (см. Приложение II и анализ Garcia-Bellido & Clesse, 2017; Clesse & Garcia-Bellido, 2017; Belotsky et al, 2019).

Отметим интересные совпадения, на которые указывают космологические наблюдения и расчеты:

1. Из наблюдаемой температуры реликтового излучения и требования фотодиссоциации атомных ядер реликтовыми гамма-квантами, можно получить оценку размера максимально сжатой Вселенной примерно в 10 световых лет.

2. Шар минимального объема, в который можно упаковать все наблюдаемые черные дыры Вселенной, имеет радиус $\sim 0.2 - 0.3$ светового года. Это означает, что процесс массового слияния

черных дыр должен наступить как раз тогда, когда коллапсирующая Вселенная достигнет размера в несколько светолет.

3. Популяции SMBH и SBH совершенно различны: количество SMBH меньше количества SBH почти на 12 порядков, а суммарная масса SMBH на 7 порядков меньше, чем у SBH, хотя по индивидуальной массе SMBH превосходят SBH на 5 порядков. Тем не менее, слияние SMBH приводит к образованию финальной дыры с радиусом 2 – 3 св. года при максимальной эффективности гравитационного излучения. Слияние всех дыр SBH при предельной эффективности гравитационного излучения должно вызывать образование единственной дыры с радиусом 0.2 – 0.4 светового года.

Совпадение столь различных по физике параметров может указывать на то, что Вселенная является самонастраивающейся системой, которая в результате многих циклов проэволюционировала к оптимальному состоянию. Например, можно выдвинуть гипотезу, что в ходе сжатия Вселенной реализуется самый эффективный алгоритм превращения черных дыр в гравитационные волны. Предположим, что черные дыры сливаются с меньшей эффективностью и порождают финальную черную дыру с размером гораздо больше, чем 10 св. лет. С точки зрения сопутствующего наблюдателя, легко проникающего внутрь этой большой черной дыры, ничто не мешает более мелким черным дырам внутри нее продолжить генерацию гравитационных волн вплоть до теоретического предела эффективности.

Логично предположить, что минимальный радиус в несколько световых лет, который оптимален для циклических преобразований компонент Вселенной, тоже является следствием баланса противоположных тенденций. Например, если этот радиус будет больше оптимального, то при сжатии Вселенной не будет достигнута нужная температура фотодиссоциации ядер тяжелых элементов. Если же этот радиус будет меньше оптимального, то в такой объем не вместятся все черные дыры, существующие во Вселенной.

19.2 Гравитационно-волновое эхо Большого коллапса

В статье Горькавого и Тюльбашева (2021) было показано, что в момент максимального сжатия Вселенной происходит массовое слияние черных дыр, которое порождает мощную вспышку гравитационного излучения (рис. 11).

Гравитационное излучение двойной системы имеет частоту вращения черных дыр вокруг центра инерции системы. Максимум частоты вращения достигается, когда расстояние между дырами становится близко к размеру черной дыры. Так как типичное значение массы черных дыр составляет несколько масс Солнца, то нетрудно показать, что, в пике мощности вспышки гравитационного излучения, ее частота должна быть близка к сотне герц (см. Приложение II). Именно такое излучение при современном слиянии пар черных дыр звездных масс регистрируется детектором LIGO. Естественно, при сжатии Вселенной темп таких слияний был неизмеримо выше, и мощность излучения в момент максимального коллапса была исключительно высока (при сохранении тех же частот гравитационных волн).

Любое излучение, возникшее на ранних стадиях Вселенной, испытывает красное смещение, то есть увеличение длины волны в z раз. Это увеличение примерно равно отношению современного диаметра Вселенной к реликтовому размеру нашего мира во время вспышки гравитационного излучения. Как обсуждалось в разделе 19.1, целый ряд фактов указывает на то, что минимальный размер Вселенной, при котором количество слияний черных дыр было максимальным, составляет несколько световых лет, что соответствует $z \sim 10^{10}$. Следовательно, длина волны реликтового излучения испытала красное смещение на 10 порядков, поэтому волны с частотой в 100 герц, возникшие при Большом Сжатии, должны превратиться в волны с современной частотой 10^{-8} Гц (рис. 11).

Как черные дыры накапливаются в течение многих сотен циклов, так и длинноволновое гравитационное излучение должно переходить из цикла в цикл, увеличивая свою суммарную энергию и создавая фон реликтовых гравитационных волн (GWB - Gravitational Wave Background) (рис.11). И сейчас вокруг нас существует не только смесь черных дыр из сотен космологических циклов, но и фон гравитационных волн разных возрастов. Как было показано в разделе 12.2, примерно 0.1-1%

массы Вселенной при каждом сжатии Вселенной может превращаться в гравитационные волны. Если накапливать эти волны в течение 100-1000 космологических циклов, то суммарная энергия таких реликтовых гравитационных волн будет сопоставима с общей энергией Вселенной. Как показано расчетами Горькавого и Тюльбашева (2021), примерно такое же количество циклов требуется, чтобы во Вселенной установилось стационарное распределение черных дыр по массам.

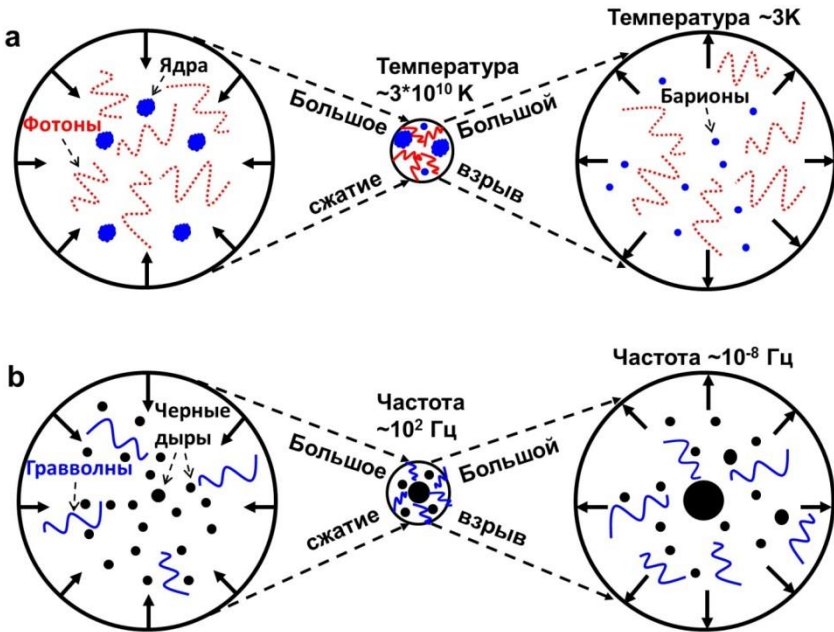


Рис. 11 Эволюция (a) реликтовых электромагнитных волн и (b) реликтового гравитационного излучения во Вселенной при Большом сжатии и Большом взрыве. При сжатии тяжелые ядра распадаются на барионы, а также образуется самая Большая Черная Дыра. Рисунок из статьи Gorkavui et al. (2018), с модификациями.

Статья Горькавого и Тюльбашева, где был предсказан «высокий уровень реликтового гравитационного излучения, порождаемого в момент максимальных сжатий Вселенной и массовых слияний черных дыр», была написана весной и

отправлена летом 2019 года в «Астрономический журнал», но натолкнулась на малоквалифицированных (или предубежденных, что равносильно недостаточной квалификации) рецензентов. 6 мая 2020 года статья была направлена в «Астрофизический бюллетень» и, после длительных дискуссий с рецензентами, была принята к печати 3 марта 2021 года. Мы отмечаем эти даты, чтобы сопоставить их с публикациями осени-зимы 2020 года, где было описано открытие наногерцовых гравитационных волн, на основе радионаблюдений пульсаров. Эти наблюдения будут рассмотрены в следующей главе.

20. Открытие предсказанного фона реликтовых гравитационных волн

Переход к существованию мира был «оплачен», несомненно, великолепным энтропическим взрывом, цену которого мы можем теперь измерить с помощью излучения, открытого Пензиасом и Вильсоном...

И. Пригожин, И. Стенгерс (1990)

Нобелевский лауреат Илья Пригожин глубоко чувствовал физику Вселенной и называл Большой взрыв «энтропическим взрывом». Он понимал, что такое событие должно представлять собой всплеск энтропии. Эта мысль Пригожина подтверждается нашей космологической моделью, где Большой взрыв сопровождается быстрым образованием набора сверхмассивных черных дыр и самой Большой Черной Дыры, что эквивалентно стремительному росту энтропии, которая содержится в черных дырах (см. рис. 8). Прямым свидетелем тех событий является не только реликтовое микроволновое излучение, но и реликтовые гравитационные волны наногерцового диапазона.

20.1 Наблюдения наногерцовых волн по сигналам пульсаров

Пульсары представляют собой высокоточные источники периодических сигналов. Самыми точными «космическими часами» среди них являются миллисекундные пульсары,

вращающиеся со скоростью 100-700 оборотов в секунду. Эти пульсары очень стары и часто находятся в шаровых скоплениях гало (может, среди этих пульсаров есть и реликтовые нейтронные звезды?) Точность хода таких космических часов лучше, чем у атомных. Именно возле миллисекундного пульсара были обнаружены первые экзопланеты, которые своим орбитальным движением смещали частоту сигнала пульсара.

В 1978 году астрофизик Михаил Сажин из московского Астрономического института им. Штернберга предложил метод прямой регистрации гравитационных волн наногерцового диапазона с использованием пульсаров в качестве точных часов («Возможности детектирования сверхдлинных гравитационных волн»). Идея метода была в том, что в гравитационной волне пространство-время искривляется, поэтому и скорость времени испытывает периодические колебания. Если между Землей и пульсаром, который находится, например, на расстоянии тысячи световых лет, время колеблется из-за гравитационной волны, то частота получаемого пульсарного сигнала будет соответственно варьироваться. Сажин рассмотрел разные варианты генерации сверхдлинных волн и пришел к выводу, что перспективным источником может быть пара сверхмассивных объектов в 10^{10} солнечных масс, вращающихся друг вокруг друга с периодом 10 лет. Через год в *Astrophysical Journal* астроном Йельского университета Стивен Детвейлер опубликовал аналогичное исследование, сославшись на статью Сажина. Он полагал, что таким методом можно будет регистрировать гравитационную волну с периодом в 1-10 лет и уровнем безразмерной амплитуды в 10^{-11} .

Первый миллисекундный пульсар был открыт в 1982 году. Разработка теоретических методов анализа сигналов таких пульсаров потребовала много лет. С 2005 года стала накапливаться база данных с точными наблюдениями сигналов миллисекундных пульсаров, которая была пригодна для поиска сверхдлинных фоновых гравитационных волн. Около полутора десятков крупнейших радиотелескопов мира объединились в международный консорциум для сбора данных по миллисекундным пульсарам. В него вошли радиотелескопы США, Канады, Европы, Австралии, Китая и Индии.

Команда NANOGrav (североамериканский консорциум из пяти крупных радиотелескопов) накопила и исследовала 11-ти летний массив данных, но не нашла следов сверхдлинных волн. Но в сентябре 2020 года командой NANOGrav был опубликован препринт анализа 12.5 летнего массива данных с использованием усовершенствованной методики обработки сигналов. В исследовании объявлялось о вероятном открытии наногерцовых гравитационных волн с периодом колебаний от 2 до 10 лет и уровнем безразмерной амплитуды 10^{-15} . Статья вышла в окончательном варианте 24 декабря 2020 года. В 2021 году другая группа ученых подтвердила этот результат по независимым данным австралийского радиотелескопа (PPTA) в обсерватории Паркса (Goncharov et al., 2021). По 26 миллисекундным пульсарам группа PPTA нашла сигнал с периодом 1 год и амплитудой $2.2 * 10^{-15}$. В 2022 году можно ожидать публикацию результатов анализа 15-ти летней базы данных, которые были получены до разрушения радиотелескопа в Аресибо (Пуэрто-Рико) в середине 2020 года. Это позволит подтвердить и лучше понять характеристики сверхдлинных гравитационных волн.

Гравитационные волны имеют квадрупольный характер. Поэтому гравитационные волны между наблюдателем и набором пульсаров должны вызывать не только задержки радиосигналов, но и корреляцию (или антикорреляцию) сигналов, приходящих от пар пульсаров, разнесенных по небу на значительное угловое расстояние. Как видно по данным NANOGrav и PPTA, такая квадрупольная корреляция есть, но она имеет слабую статистическую значимость. Из дискуссии, которая развернулась вокруг этой проблемы (см. Приложение II и ссылки в статье Gorkavii, 2022), следует, что для слабой статистической значимости квадрупольности сигнала есть определенные причины, и с дальнейшим ростом статистики признаки квадрупольности должны быть более явными. Если квадрупольность будет подтверждена на хорошем уровне достоверности, тогда наногерцовые колебания сигнала пульсаров получат однозначную интерпретацию как гравитационные волны (хотя никаких альтернативных гипотез – чем иным могут быть объяснены эти колебания? – выдвинуто не было).

Для образования стохастического фона гравитационных волн и объяснения результатов NANOGrav и PPTA, были выдвинуты не только гипотеза о парах сверхмассивных черных дыр в центрах слившихся галактик, но и целый ряд других идей, которые будут обсуждены в следующем разделе.

20.2 Ключевое подтверждение для модели циклической Вселенной

Стандартная космологическая модель Λ CDM дает превосходное описание широкого спектра астрофизических и астрономических данных. Однако есть несколько больших проблем, из-за которых стандартная модель выглядит как первое приближение к более реалистичному сценарию, который еще предстоит полностью понять.
Э. Ди Валентино и др. (2020)

Гипотезы о природе источника обнаруженных наногерцовых волн, которые выдвинуты в литературе, можно поделить на 4 класса:

- A. Классическая модель: наблюдаемый стохастический фон гравволн образован гравитационным излучением от сравнительно недалеких двойных сверхмассивных черных дыр. Речь идет не о финальном всплеске излучения в момент слияния дыр, а об излучении, которое испускается достаточно продолжительное время перед слиянием. В такой модели есть серьезные проблемы. В первую очередь, неизвестно количество двойных сверхмассивных черных дыр в галактиках. Неопределенности в оценке могут достигать нескольких порядков. Во-вторых, расчеты вероятности сближения и слияния таких дыр весьма затруднительны, особенно когда расстояние между этими дырами становится сравнимо с несколькими световыми годами: трудно найти тормозящие факторы,

которые принуждают черные дыры к дальнейшему сближению (проблема «финального парсека»). На взаимном расстоянии в парсек двойные черные дыры могут вращаться с периодом в тысячи лет. Чтобы генерировать излучение с периодами порядка года, им нужно сократить это расстояние в сто раз. Остается неясным, с какой вероятностью вращающиеся SMBH преодолеют за космологическое время этот последний парсек и дойдут до стадии мощного гравитационного излучения.

- В. Модели квантовой космологии, которые включают десятки разных гипотез: от флуктуаций квантовых полей, до лопающихся гигантских космических струн и разрушения стенок гипотетических фазовых переходов. Все эти модели имеют один базисный (его лучше назвать фатальным) недостаток: под ними нет фундаментальной проверенной теории типа ОТО, они основаны на сугубо гипотетических предположениях. Само обилие взаимоисключающих, преимущественно квантовых, моделей происхождения фона наногерцовых гравитационных волн значительно снижает вероятность того, что верна хотя бы одна из них.
- С. Первичные черные дыры, возникшие после Большого взрыва. Для образования таких дыр тоже нужны какие-то гипотезы *ad hoc*, типа коллапса флуктуаций нужного размера и амплитуды, которые возникают или в существующей среде, или в гипотетических полях. Сравнительно высокочастотное гравитационное излучение, возникшее при взаимных слияниях первичных дыр в раннюю эпоху Вселенной, растянулось к настоящему времени в наногерцовую область.
- Д. Реликтовые черные дыры, возникшие при взрывах сверхновых прошлых космологических циклов и перешедшие в наш цикл. Наиболее многочисленными в таком распределении являются черные дыры звездных масс, причем возле границы минимальных масс – около 5-10 масс Солнца (см. иллюстрацию 13). Такие

дыры при слиянии генерируют сравнительно высокочастотное (около сотни герц) гравитационное излучение, которое уменьшило свою частоту к нынешней эпохе до наногерц (см. обсуждение в главе 19). Фактически, GWB является древними гравитационными волнами, аналогичными тем, которые обнаружил LIGO, только увеличившие длину волн в $\sim 10^{10}$ раз из-за расширения Вселенной.

Отметим, что три первых класса гипотез приводят к достаточно плавному спектру наногерцовых гравволн. В этих гипотезах, насколько известно автору, нет каких-либо физических причин предполагать характерные особенности спектра в виде острых пиков или провалов. Например, сверхмассивные черные дыры, на которых основана первая модель, имеют спектр масс протяженностью пять порядков величины и любые взаимные расстояния на последнем парсеке. В отличие от других, последняя модель гораздо более конкретна. Ведь она предполагает, что черные дыры образуются в результате взрывов сверхновых, которые порождают или черные дыры, или нейтронные звезды, которые при определенных условиях могут впоследствии превратиться в черные дыры, например, при слиянии двух нейтронных звезд. Поэтому в такой модели, спектр наногерцовых гравволн тянется далеко в область длинных волн, а вот в области коротких волн или высоких частот он должен обрываться. Дело в том, что частота гравитационных волн, возникающих при слиянии черных дыр, задается частотой орбитального вращения или, в пике излучения, минимальным взаимным расстоянием, то есть радиусом дыр, а, следовательно, их массой. Чем мельче черная дыра, тем более высокочастотную волну она породит при слиянии с такой же дырой. Но астрофизическое происхождение накладывает теоретическое ограничение на массу дыр – они не могут быть меньше 3-4 масс Солнца - и это подтверждается наблюдательными данными LIGO и других гравитационных детекторов (илл. 13). Следовательно, именно такие дыры и дадут самую высокочастотную волну, которая сейчас должна быть как раз в районе $3.2 * 10^{-8}$ герц. Если уменьшить массу, то это будет уже не черная дыра, а нейтронная звезда, у которой радиус больше, а, следовательно, и

частота гравволн при слиянии будет меньше. Значит, если наблюдаемые наногерцовые волны рождаются реликтовыми дырами, то после частот $> 3.2 * 10^{-8}$ герц будет провал, практическое отсутствие гравволн.

Горькавый (Gorkavyi, 2022) построил простую модель формирования спектра наногерцовых гравволн, взяв за основу спектр по размерам черных дыр, наблюдаемых LIGO по гравитационному излучению (илл. 12 и 13). На основе этого спектра по размерам был построен спектр генерируемых гравитационных волн, в котором учитывались только гравитационные волны в пике мощности и максимуме частоты – то есть, возникающих в момент слияния дыр. Это предположение позволяет однозначно связать размер дыр и частоту генерируемых гравитационных волн (рисунок 12).

На рисунке 12 нижняя линия показывает распределение черных дыр по размерам. Ось абсцисс уже переведена в частоты, поэтому можно сказать, что это распределение дыр по частотам гравизлучения, итоговый спектр которого отмечен верхней ломаной кривой. Прямоугольник из штрихованной линии – это область наблюдаемого NANOGraV сигнала, с наиболее вероятной линией наклона спектра в виде сплошной диагонали, которая продолжена далее штрихами. Она близка к теоретической наклонной линии, которая получена для излучения от пар сверхмассивных дыр. Отметим, что спектр гравволн, который вычисляется на основе модели реликтовых черных дыр, тоже близок по наклону к наблюдаемой кривой (с учетом того, что в точке, соответствующей 55 массам Солнца, начала теоретической и наблюдательной кривых совмещены).

Мы полагаем, что наиболее достоверная часть распределения черных дыр по размерам (и массам) приходится на интервал от 55 до 22 солнечных масс. После точки, соответствующей 22-м массам Солнца, число наблюдаемых черных дыр падает. Вероятнее всего, это эффект наблюдательной селекции, потому что легкие дыры сложнее обнаруживать детектором LIGO. Согласно теориям образования звезд при взрыве сверхновых и моделям накопления черных дыр в циклической Вселенной, максимальное количество дыр должно быть в районе $5M_{\odot}$.

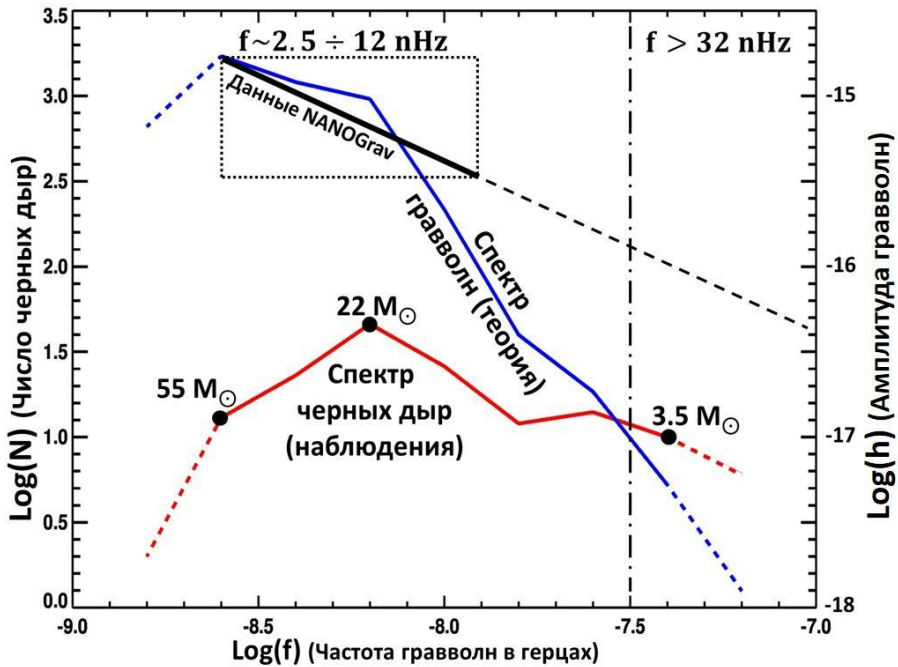


Рис. 12 Сплошная кривая внизу: спектр масс черных дыр по данным LIGO с добавлением черных дыр в двойных звездных системах (Abbot et al., 2020, Черепанчук, 2014) в зависимости от частоты гравволн (стрелками отмечены массы ЧД на изломах кривой). Сплошной линией сверху показана теоретически рассчитанная амплитуда гравитационного излучения при слиянии черных дыр. Пунктирными частями ломаных кривых показаны зоны с низкой статистикой. Пунктирным прямоугольником показана граница, соответствующая частоте гравитационных волн, обнаруженных NANOGrav (жирная прямая линия, максимум которой совпадает с максимумом модельной кривой). Штрихпунктирной вертикальной линией показана граница, соответствующая частоте гравитационных волн $3.2 \cdot 10^{-8}$ Гц (или 1/год) от слияния черных дыр при $\sim 4M_{\odot}$, поэтому справа от этой линии будет сильный дефицит гравволн по сравнению с экстраполированными данными NANOGrav (пунктирное продолжение толстой прямой линии) и теоретическими моделями, основанными на гравитационных волнах от сверхмассивных черных дыр (Jaffe & Baker, 2003).

Тем самым, спектр гравволн может падать с ростом частоты в зоне $\lg(f) > -8.2$ Гц медленнее, чем показано на рис.12, а может даже расти, в противоречии с предсказанием классических моделей класса А.

Интересно, что на рис. 1 в недавней работе по наблюдениям наногерцовых волн (Antoniadis et al., 2022) можно увидеть тенденцию к росту амплитуды сигнала в интервале $f \sim 10^{-8} - 3.2 * 10^{-8}$ Гц, то есть, при приближении к периоду колебаний в один год. Насколько эта тенденция достоверна – покажут дальнейшие наблюдения. Наиболее уверенное предсказание модели D, основанной на реликтовых черных дырах астрофизического происхождения, заключается в том, что после периода волн примерно в год, при $f > 3.2 * 10^{-8}$ Гц, в спектре гравитационных волн будет провал, связанный с отсутствием черных дыр меньше, чем 3-4 массы Солнца. Если этот провал будет подтвержден, это будет ключевым доказательством цикличности нашей Вселенной, потому что никакие другие модели не делают похожего предсказания.

С нашей точки зрения, достоверность открытия стохастического фона гравитационных волн подтверждается и тем, что существование мощного фона реликтовых наногерцовых волн было предсказано в статье Горькавого и Тюльбашева (2021), представленной в журнал в мае 2020 года, за несколько месяцев до опубликования статьи группы NANOGrav об открытии длинных гравволн. Статья Gorkavyi (2022) о конкретном виде спектра гравитационных волн, который генерируют реликтовые черные дыры, была написана весной 2021 года для объяснения данных NANOGrav. В статье не было выдвинуто никаких новых гипотез *ad hoc* и не делалось каких-либо существенных предположений, а просто рассмотрена наблюдаемая популяция черных дыр, которая может объяснить темную материю, и динамика накопления которой была изучена в работе Горькавого и Тюльбашева (2021). Gorkavyi (2022) показал, что неизбежный всплеск слияний этих черных дыр при максимальном сжатии пульсирующей Вселенной легко объясняет открытый фон наногерцовых гравитационных волн.

Мы считаем, что данные NANOGrav и PPTA подтверждают гипотезу о том, что черные дыры могут составлять основную часть темной материи (Bird et al., 2016;

Kashlinsky, 2016; Clesse & Garcia-Bellido, 2017) и что значительная часть наблюдаемых черных дыр пришли из прошлого цикла пульсирующей Вселенной (Carr & Coley, 2011; Gurzadyan & Penrose, 2013; Clifton et al., 2017). Примечательно, что параметр красного смещения $z \sim 10^{10}$, вытекающий из требования эффективной фотодиссоциации атомных ядер на стадии максимального сжатия в циклической Вселенной, оказывается как раз таким, чтобы частота реликтовых гравитационных волн, растягиваясь, совпала с частотой гравитационных волн, наблюдаемых NANOGrav и PPTA! Еще одна явная неслучайность - в добавление к списку совпадений в разделе 19.1.

Из нашей модели можно сделать конкретные выводы, которые можно проверить наблюдениями:

1. Спектр наногерцовых гравволн не будет описываться законом Планка или каким-либо другим законом, связанным с тепловым равновесием. Реликтовые фоновые гравволны должны отражать наблюдаемое распределение черных дыр (SBHs и SMBHs).
2. Амплитуда реликтовых гравволн слабо меняется с увеличением частоты до периода в один год, но потом она должна быстро уменьшаться с ростом частот $f > 3.2 * 10^{-8}$ Гц (или $f > 32$ нГц) (период колебаний меньше года) из-за отсутствия астрофизических черных дыр с массами $< 4 M_{\odot}$. Эта особенность спектра не предсказывается любой другой моделью, в том числе, основанной на гипотезе о первичных черных дырах, рожденных в результате Большого взрыва.
3. Многочисленные сверхмассивные черные дыры, которые в настоящее время наблюдаются в центрах галактик, должны генерировать во время Большого сжатия ультранизкочастотные (в настоящее время) GWB $f \sim 10^{-14} - 10^{-17}$ Гц.

20.3 Реликтовые килогерцовые гравитационные волны

Согласно циклической космологии, суммарная энергия гравитационных волн должна быть близка к критической плотности замкнутой Вселенной - см. Приложение II, раздел 2,

формулы (33),(35). Но энергия фоновых наногерцовых гравитационных волн, недавно открытых консорциумом NANOGrav, оказалась мала по сравнению с критической плотностью. Это выглядит неожиданным, потому что эти волны возникли в момент максимального сжатия Вселенной, когда частота слияний и концентрация черных дыр была самой большой. Гравитационные волны от сотен герц и ниже генерируются как при слиянии черных дыр, так и при аккреции вещества на черные дыры. Мощная вспышка гравитационных волн на финальной стадии коллапса вызвала уменьшение гравмассы Вселенной, антигравитацию и Большой взрыв. Почему фон этих гравитационных волн оказался в настоящее время незначительным по энергии? Потому что при расширении Вселенной в 10^{10} раз (от 10 светолет до современного размера), частота, а, следовательно, и энергия реликтового гравитационного излучения уменьшается на этот коэффициент. Но, как показывают данные LIGO, черные дыры звездных масс, самые многочисленные в популяции дыр, сливаются и сейчас. Современные слияния черных дыр происходят гораздо реже, чем при Большом взрыве, зато гравитационные волны, образованные при нынешних слияниях, имеют небольшое красное смещение и сохраняют свою начальную частоту в сотню герц. Можно ли сравнить энергию гравитационных волн, пришедших от начала Большого Взрыва и от слияний близких черных дыр? В циклической Вселенной фоновые гравитационные волны, как и черные дыры, накапливаются в течение многих циклов. Гравитационная волна, рожденная в какую-то эпоху, соответствующую конкретному радиусу Вселенной, будет при последующем сжатии Вселенной увеличивать свою частоту, а при расширении в следующем цикле – снова уменьшать, проходя свое начальное значение частоты именно на том радиусе Вселенной, когда волна родилась. Поэтому вокруг нас должны наблюдаться как волны, рожденные в момент Большого Взрыва нашего цикла, так и волны, возникшие в эпоху максимального расширения Вселенной в прошлых циклах. Если гравитационные волны от Большого взрыва уменьшили к нашему времени свою частоту до наногерцового диапазона, то волны из эпохи максимального размера Вселенной, наоборот, приходят к нам с повышенной частотой, потому что наблюдаемая часть Вселенной

нашего цикла еще не достигла максимального размера, когда эти волны образовались.

Рассмотрим простую модель генерации гравитационных волн в разные эпохи расширения Вселенной. Пусть максимальная частота слияний дыр звездных масс приходится на минимальный размер Вселенной $R_0 \sim 10$ светолет. При расширении Вселенной до размера R_x , частота слияний черных дыр падает как $1/R_x^3$. Далее мы полагаем, что к времени расширения Вселенной до размера R_x , черные дыры образуют гравитационно связанные шаровые скопления, которые больше не расширяются. Тем самым, падение частоты слияния черных дыр останавливается. Мы будем полагать, что эта частота остается примерно постоянной - вплоть до максимального радиуса Вселенной $R_{max} \sim 1$ триллион светолет (будем рассматривать только стадию расширения, полагая, что стадия сжатия Вселенной повторяет рассматриваемые процессы, только в обратном порядке). Проинтегрируем, с учетом космологического красного смещения, наблюдаемую в настоящий момент энергию гравитационных волн E_0 , возникших при эволюции Вселенной от размера R_0 до R_x и энергию волн E , сгенерированных при изменении размеров Вселенной от R_x до R_{max} . Несложно получить простую формулу:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{R_0 R_{max}^2}{2R_x^3} \sim 5 * 10^6 \quad (13)$$

где принята оценка $R_x \sim 10^6$ светолет и условие $R_{max} \gg R_x \gg R_0$. Следовательно, хотя энергия фоновых гравитационных волн имеет заметный пик на наногерцовой частоте, основная энергия (возможно, в миллионы раз большая!) будет содержаться в главном пике килогерцовых гравитационных волн, образованных при слиянии черных дыр звездных масс в момент максимального расширения Вселенной. Частота таких килогерцовых волн будет равна $\nu \approx \nu_0 (R_{max}/R_c) \sim 2000$ гц, где $R_c \approx 46$ млрд. светолет - современный радиус Вселенной, а $\nu_0 \sim 100$ гц - частота современных гравитационных волн, регистрируемых LIGO.

Обратим внимание, что вывод предыдущего раздела о дефиците гравитационного излучения на периодах меньших года, основывался на наблюдаемом распределении черных дыр по массам и относился к частотному спектру гравитационных

волн, рожденных в момент максимального сжатия Вселенной. Если учесть генерацию гравитационных волн в более поздние периоды Вселенной, то можно оценить, что минимум энергии фона гравитационных волн будет лежать в миллигерцовой области $\nu \approx \nu_0(R_x/R_c) \sim 10^{-3}$ гц. Окончательные заключения о спектре фоновых гравитационных волн может дать только детальное моделирование, а также более точные наблюдения миллисекундных пульсаров. Отметим, что детектор LIGO не приспособлен для регистрации фоновых гравитационных волн, он может улавливать волны лишь от близких отдельных слияний черных дыр. Поэтому имеет смысл разработать способы регистрации самых энергичных фоновых волн килогерцового диапазона. Возможно, фон реликтовых волн высокой частоты уже как-то проявляется в астрономических наблюдениях. Известны загадочные килогерцовые квазипериодические осцилляции, открытые, например, в гамма-всплесках, где в частотном спектре двух событий отмечены пики с практически одинаковыми частотами в 2612 и 2649 герц (Chirenti et al., 2023). Не исключено, что эта совпадающая частота вызвана влиянием фоновых килогерцовых пространственно-временных колебаний.

21. Прошлое и будущее Вселенной

*Скудость познания мысль беспокоит тревожным сомнением,
Именно: было иль нет когда-то рождение мира,
И предстоит ли конец, и доколь мироздания стены
Неугомонный напор движения выдержать могут;
Или, по воле богов одаренные крепостью вечной,
Могут, в течение веков нерушимо всегда сохраняясь,
Пренебрегать необъятных веков сокрушительной силой?*

Тит Лукреций Кар, «О природе вещей» (60-й год до н.э.)

Эта книга посвящена построению и анализу циклической модели Вселенной. Механизмы, которые лежат в основе периодического расширения и сжатия нашего мира, восхищают своей элегантностью и неизбежностью. Как возникло это глубоко закономерное мироустройство? Была ли случайная флуктуация его началом, или мы имеем дело с

детерминированным процессом рождения Вселенной? И какова прочность мирового механизма? Сколько циклов он может еще выдержать, не сломавшись?

В ответ мы можем только строить гипотезы, шаткие и неподтвержденные. Не переоценивая надежности этих предположений, полагаем, что для развития науки важны даже такие зыбкие начальные умопостроения.

21.1 Размышления о самом первом цикле Вселенной

Все возникающее должно иметь какую-то причину для своего возникновения, ибо возникнуть без причины совершенно невозможно.
Платон

Статическую бесконечную Вселенную можно было бы получить в единственном случае: если бы на больших расстояниях гравитация приводила к отталкиванию между телами.
Стивен Хокинг (1985)

С чем же связано происхождение Вселенной – с особенностью или с неустойчивостью?
Г. Николис и И. Пригожин (1990)

Как возникла наша замкнутая Вселенная или Мегадыра с ее содержимым? Практически единственный разумный ответ, который возможен при нынешнем понимании космологии: Вселенная возникла вследствие огромной флуктуации. Если существовала бесконечная самогравитирующая среда с небольшой плотностью гравитационных волн и какой-то обычной материи (фотонов, барионов, электронов, нейтрино и т.д.), то всегда можно выделить объем, гравитирующая масса в котором будет достаточна для замыкания пространства или образования огромной черной дыры.

Если наша Вселенная – замкнутое пространство, как полагал в 1917 году Эйнштейн, то ее внешний радиус не меняется (из-за закона сохранения энергии), и вопрос о существовании чего-либо за границей Вселенной не имеет смысла.

Если же, следуя, например, Н. Поплавскому, принять, что Вселенная находится в черной дыре (в Мегадыре, по нашей терминологии), то ситуация осложняется, ведь черные дыры существуют в некотором пространстве, где могут двигаться и сливаться друг с другом. Если за границей Мегадыры существует другая Вселенная, то она может столкнуться с нашей. Следовательно, в черную дыру могут проникать внешние наблюдатели, а также различные волны и вещество. Мегадыра может увеличиваться со временем; теоретически, из каждой дыры можно вырастить Вселенную с достаточно богатым содержимым и даже с живыми организмами, которые, хотя бы изредка, будут задаваться вопросами космологической важности.

В рамках циклической космологии вопрос о происхождении нашей Вселенной упирается в два главных практических следствия:

1. Радиус Вселенной постоянен или растет от цикла к циклу?
2. Есть ли за границей Вселенной нечто, способное проникнуть внутрь нашей Вселенной?

Ньютоновская космология не допускала бесконечную однородную вселенную, потому что из-за притягивающей гравитации такой мир является неустойчивым. Как мы показали ранее, коллапс гравитирующей системы вызывает всплеск гравитационных волн, уменьшение гравитационной массы и монополярную антигравитационную волну, которая приводит к расширению системы. Эта волна антигравитации распространяется наружу, уменьшая с расстоянием свою амплитуду как $1/R$. Так как гравитационное притяжение падает сильнее: $1/R^2$, то на больших расстояниях будет наблюдаться следующая картина: пробное тело долгое время притягивается к нашей Вселенной из-за ее гравитации, а потом на него из нашей системы налетает антигравитационная монополярная волна, которая настолько сильна, что за короткое время отбрасывает тело на значительное расстояние, откуда оно снова начинает свое

долгое падение. Возникает интересный вопрос: можно ли построить в рамках ОТО, с помощью баланса гравитационного притяжения и дальнедействующей антигравитации, бесконечный, хотя и локально неоднородный, мегамир с локальными осциллирующими вселенными? Такой бесконечный мир, который можно назвать МегаВселенной, будет представлять собой набор из многих вселенных, свободно двигающихся или организованных в кластеры, а может – и в кристаллическую структуру, где каждая вселенная занимает свой узел решетки. Отметим принципиальную разницу этой картины от инфляционного «мультиверса», где законы физики широко варьируются между быстро размножающимися вселенными: в МегаВселенной все законы одинаковы. Фактически, МегаВселенная - это и есть одна бесконечная вселенная, которой энергетически выгодно самоорганизоваться в пульсирующие подструктуры типа нашей Вселенной, число которых постоянно или меняется мало.

Вряд ли можно, хоть с какой-то долей уверенности, выбрать какой-либо из этих вариантов. В дальнейших рассуждениях мы будем рассматривать только нашу Вселенную (как мы делали и во всех предыдущих главах), полагая, что ее размер равен диаметру Мегадыры и не меняется. Вопрос о существовании чего-либо за границей нашей Вселенной не актуален, потому что там лежит область ненаблюдаемого (в данный момент несущественно: ненаблюдаемого принципиально или практически).

Итак, предположим, что Вселенная первого цикла возникла в результате гигантской флуктуации разреженной среды. Она, вероятно, совпадала с Вселенной нашего цикла по общей массе или энергии, но очевидно, что ее внутреннее содержание выглядело совсем по-другому. Как эволюционировало содержание Вселенной после ее образования?

Очевидно, что если гравитации среды было достаточно для замыкания Вселенной первого цикла, то этот цикл начался с сжатия вещества к центру вновь образованной Мегадыры. Отметим разительный контраст этого сценария с инфляционными и другими одноразовыми моделями Вселенной, которые стартуют от сверхплотного и компактного состояния мира. Циклическую многоразовую модель Вселенной логично

начинать, наоборот, с максимально разреженного состояния, трудноотличимого от вакуума. Если не учитывать гравитацию, то такое состояние можно рассматривать как максимальное по энтропии. Но учет гравитации и возможного будущего образования гравитирующих сгустков и черных дыр, кардинально меняет ситуацию: такое начальное состояние Вселенной можно считать минимальным по энтропии, потому что дальнейшая эволюция будет ее только увеличивать.

Начало последующих циклов Вселенной тоже правильнее отсчитывать не от Большого взрыва или от расширения плотного и горячего шара, который образуется в середине цикла, а с самого разреженного холодного состояния, возникающего в момент остановки расширения, перехода к минимуму энтропии и к сжатию нашей Метагалактики.

Что происходит при сжатии среды, в которой нет ни звезд, ни черных дыр, а присутствует лишь гравитационные волны, фотоны и, может быть, какое-то количество элементарных частиц? Широко распространено мнение, что гравитация – это притяжение и только притяжение, которое возле сингулярности победить невозможно. Но реальность оказалась гораздо сложнее. Таблица IV кратко суммирует свойства четырех основных гравитационных феноменов. Как было детально рассказано в предыдущих главах, гравитационное притяжение нельзя победить никакой негравитационной силой, но можно победить другими феноменами гравитации, которая не сводится к притяжению.

Начальное сжатие Вселенной первого цикла определялось практически только ньютоновским притяжением, потому что оно сильнее прочих на больших расстояниях - за исключением антигравитации и гипергравитации. Но эти феномены зависят от переменности гравитационной массы, и были близки к нулю при начальном сжатии Вселенной из-за того, что генерация гравитационных волн в разреженной среде исключительно мала, а поглощение этих волн было практически пренебрежимо, потому что отсутствовали черные дыры – единственные эффективные поглотители гравитационных волн.

Таблица IV. Гравитационные феномены, определяющие динамику циклической Вселенной

<i>Гравитационный феномен</i>	<i>Зависимость от радиуса</i>	<i>В какой теории появился феномен</i>	<i>За какие космологические процессы отвечает:</i>
Антигравитация и гипергравитация	$1/R$	Общая теория относительности	Большой взрыв и ненулевую космологическую постоянную
Гравитационное притяжение	$1/R^2$	Теория Ньютона	Гравитационную неустойчивость и коллапс Метагалактики
Приливная сила	$1/R^3$	Теория Ньютона	Несимметричность коллапсирующей системы
Гравитационное излучение	$1/R^5$	Общая теория относительности	Изменение гравитирующей массы сжимающейся системы

При сокращении радиуса Метагалактики значимость приливных сил и генерации гравитационного излучения неизбежно увеличивалась, так как они растут с уменьшением размера Метагалактики быстрее притяжения. Гравитационные феномены работают для систем любого состава – хоть для газа черных дыр, хоть для фотонного облака. Не исключено, что начальная Вселенная состояла только из гравитационных волн и фотонов. Рано или поздно, но в сжимающейся Вселенной первого цикла началась интенсивная генерация гравитационных волн, обеспеченная приливными неустойчивостями, нарушающими сферическую симметрию сжимающегося шара из той материи, которая имела во Вселенной первого цикла. Рост гравитационного излучения приводил к уменьшению гравитационной массы сжимающейся Метагалактики и включению антигравитации. Первый Большой взрыв в

Метагалактике сопровождался и появлением первой Большой Черной Дыры в центре Вселенной.

В настоящее время в каждом кубическом сантиметре Вселенной содержится 400-500 квантов реликтового излучения с температурой около 3 кельвинов. При сжатии Вселенной в 10^{10} раз, до размера в несколько световых лет, концентрация реликтовых фотонов вырастет на 30 порядков, а температура фотонов достигнет 30 миллиардов градусов и станет достаточной для разбивания самых прочных атомных ядер и для генерации электронно-позитронных пар. Сжатие Вселенной первых циклов, без современной популяции звезд и черных дыр, могло быть сильнее, чем в настоящее время. Если минимальный размер Вселенной первых циклов был $\sim 0.1-0.01$ светового года, то температуры реликтовых фотонов вырастали до десятков триллионов градусов, и их энергии хватало для генерации протонно-антипротонных пар. Возможно, большая часть барионной массы мира родилась именно тогда – в первых циклах Вселенной.

Наличие асимметрии при рождении барионов могло приводить к тому, что после аннигиляции осталась лишь небольшая часть обычных протонов. Проблема барионной асимметрии хорошо известна и ее решение ищется в асимметрии процессов рождения протон-антипротонных пар. Модель циклической Вселенной не предлагает принципиально новых решений проблемы барионной асимметрии, но смягчает требования к такому решению. Периодичность Вселенной разрешает накапливать обычную материю в течение многих циклов, поэтому искомая асимметрия рождения протонов и антипротонов может быть гораздо слабее, чем это требуется в случае одноразовой Вселенной.

Начальная разреженная среда первого цикла постепенно перестраивалась внутри вновь образованной Вселенной к новому колебательному стационару со значительным количеством барионов, что было плюсом для развития сложных форм материи и разумной жизни. В ходе этой перестройки начальная энергия перераспределялась между гравизлучением, фотонами и барионной материей. Если период пульсаций Метагалактики зависел только от ее гравитирующей массы, куда не входит гравизлучение, то он мог уменьшаться из-за перехода части

гравизлучения в энергию обычного вещества – до тех пор, пока период не вышел на стационар. Таким образом, происходила эволюция физических параметров: система двигалась к более эффективной генерации гравизлучения (и его поглощения), что ускорило пульсации.

Космологическая эволюция, вероятно, сопровождалась стремлением к выравниванию плотности Вселенной. Действительно, в самых плотных частях сжатой Вселенной время замедляется, что дает возможность менее плотным областям с более быстрым течением времени «догнать» более плотные зоны. Кроме того, в плотных частях выше темп генерации гравитационного излучения (например, из-за более частого слияния черных дыр), что приводит к повышенной антигравитации в этих зонах и уменьшению их плотности при разлете.

Как эволюционировала Вселенная в случае постепенного накопления барионов? Если в начальных циклах плотность барионов в момент просветления среды (эпоха рекомбинации водорода, которая в нашем цикле случилась 380 тысяч лет после Большого взрыва) была мала, например, всего 1% от соответствующей плотности в нынешнем цикле, то неустойчивость Джинса приводила не к компактным шаровым скоплениям в 10^5 солнечных масс с размером около 100 световых лет (см. формулу (65) в Приложении II), а к более крупным коллапсирующим облакам в ~ 1000 световых лет и в миллион масс Солнца. В этих небольших квазиэллиптических протогалактиках не было сверхмассивных дыр, которые формируют современный облик галактик. Возможно, что на первых циклах Вселенной работала известная иерархическая модель роста галактик, предполагающая их укрупнение через взаимные слияния. Такие протогалактики уже могли образовывать космические светила, в том числе - звезды Вольфа-Райе, которые взрывались как сверхновые, превращаясь в черные дыры. Через несколько сот циклов, эти дыры выросли до сверхмассивных черных дыр, которые изменили сценарий эволюции галактик с медленного иерархического на быстрый аккреционный. В результате двумерной и трехмерной аккреции на сверхмассивные черные дыры, возникли спиральные и эллиптические галактики, и Вселенная приобрела современный

вид. Возможно, количество черных дыр и их распределение по массам стало оптимальным для максимальной эффективной генерации гравитационного излучения перед Большим взрывом и для нужной степени фотодиссоциации атомных ядер.

Хотя внимательный читатель может сам определить разницу между надежно установленными фактами и свободными рассуждениями данного раздела, еще раз подчеркнем, что наши соображения о первых циклах Вселенной сугубо умозрительны, хотя и учитывают результаты, полученные в рамках циклической космологии. Эти размышления должны служить лишь мотиватором для развития более детальных и строгих моделей эволюции компонент Вселенной от первых циклов до современного состояния. Только тогда можно будет установить, какие из высказанных мыслей оказались правильными, а какие – нет.

21.2 Каким будет будущее Вселенной и финал человечества?

*Возникает и уничтожается
не космос, а его состояния. В
случае если космос один,
возможность того, что,
возникнув однажды, он
уничтожится совершенно и
никогда больше не вернется
назад, исключена.*

Аристотель

*...Ты, гром,
В лепешку сплюсни
выпуклость вселенной
И в прах развей прообразы
вещей...*

*У. Шекспир, «Король Лир»
(перевод Б. Пастернака)*

Каким новая циклическая теория рисует будущее Вселенной? Гипотеза тепловой смерти более не работает, и вечного угасания Вселенной не будет. Вероятнее всего,

Метагалактика будет стабильно и бесконечно пульсировать внутри стационарной Мегадыры. Если никаких «протечек» в нашей замкнутой Вселенной нет, то ее масса и энергия будет сохраняться вечно, а распределение этой энергии между компонентами и их циклическая эволюция уже устоялись к текущему циклу, и вряд ли претерпят существенные изменения в обозримом будущем. Вторжение другой вселенной в нашу Вселенную, аналогичное слиянию двух черных дыр, можно считать маловероятным событием. Кроме того, такое событие кардинально ничего не изменит в обсуждаемой картине. Как после слияния двух дыр и всплеска гравитационных волн, образуется более крупная черная дыра, так и слившиеся вселенные, после нескольких нестандартных циклов и хаотических колебаний, придут к новому стационару: более крупной Вселенной с пульсирующей внутри Метагалактикой, в которой распределение энергии между компонентами может измениться, но не принципиально. Сам момент вторжения другой вселенной будет замечен разве что дотошными астрономами, которые могут обнаружить, что далекие галактики в какой-то части неба испытывают не красное, а голубое смещение.

Успокоившись по поводу дальнейшего существования циклической Вселенной, поговорим о более актуальной теме – о будущем человечества в данном космологическом цикле. Млечный Путь будет разлетаться вместе с другими галактиками, видимо, десятки миллиардов лет, после чего нас всех поглотит Большая Черная Дыра. Человечество от этого не пострадает, а просто перейдет в новый космологический цикл, который начинается с минимума энтропии и с нового сжатия Вселенной. Если расширяющуюся Вселенную иллюстрировать раздувающимся шариком, то сжимающуюся Вселенную хорошо представлять сжимающимся шариком с точками нарисованных галактик. Чем дальше галактика, тем быстрее она будет двигаться к нам, следовательно, мы будем жить в поле галактик не с красным смещением, как сейчас, а с голубым. Процесс сжатия будет тоже очень долгим, порядка ста миллиардов лет. Постепенно, при сжатии Вселенной температура ночного неба (или температура реликтового излучения) будет нарастать. Например, сжатие Вселенной в сто раз от современного состояния, увеличит

температуру неба до комнатной температуры. Рано или поздно, небесный жар вырастет настолько, что сделает жизнь на Земле невозможной (мы тут оптимистично предполагаем, что Солнце, меняя свою светимость и размер, не сможет уничтожить человечество до обсуждаемого момента). В пределе максимального сжатия Вселенной, энергия реликтовых фотонов, которые превратятся в гамма-кванты, станет настолько большой, что будут уничтожены не только сложные молекулы, но и даже ядра самых прочных атомов. Земля полностью испарится под воздействием такого жесткого излучения.

Сможет ли уцелеть наблюдатель или хоть какая-то информация при переходе от Большого коллапса к Большому взрыву? Академик А.Д. Сахаров обдумывал эту впечатляющую идею в своих космологических работах, посвященных циклической Вселенной, которую он называл «многолистной»: «С многолистными моделями связана еще одна интригующая воображение возможность, верней – мечта. Может быть, высокоорганизованный разум, развивающийся миллиарды миллиардов лет в течение цикла, находит способ передать в закодированном виде какую-то ценную часть имеющейся у него информации своим наследникам в следующих циклах, отделенных от данного цикла во времени периодом сверхплотного состояния?.. Эта возможность, конечно, совершенно фантастична, и я не решился писать о ней в научных статьях, но на страницах этой книги дал себе волю. ...Но и независимо от этой мечты гипотеза многолистной модели Вселенной представляется мне важной в мировоззренческом философском плане».

Итак, как может уцелеть хотя бы часть человечества при предельном сжатии Метагалактики? Можно ли спрятаться от коллапса в нейтронной звезде? Если нейтронные звезды не успевают растаять при Большом сжатии, то, теоретически, можно пережить коллапс Вселенной внутри нейтронной звезды, хотя возникающие при этом практические трудности делают этот вариант маловероятным.

Но может быть есть возможность уцелеть на периферии Вселенной, не забираясь в ее горячую сердцевину? Для этого стоит рассмотреть более детально структуру Вселенной, которая состоит, но нашим, возможно, очень упрощенным

представлениям, из стационарной Мегадыры и пульсирующей Метагалактики, тесно взаимодействующей с Большой Черной Дырой (см. рисунок 9).

Гравитационные волны являются важной компонентой Вселенной и обладают очень необычными свойствами. Гравитационная энергия, которая содержится в этих волнах, сама не гравитирует, но увеличивает гравитационную массу черных дыр, когда волны поглощаются ими. Это существенный момент для понимания процесса пересечения наблюдателем поверхности Большой Черной Дыры *).

После пролета поверхности Шварцшильда и отдалении от нее, наблюдатель перестанет видеть Большую Черную Дыру, зато снова увидит вокруг себя галактики и гравитационные волны, которые ранее были поглощены БЧД. Следовательно, реально регистрируемая гравитационная масса Вселенной для него уменьшается из-за того, что гравитационные волны не обладают гравитационной массой. Это означает, что теоретически, корабль с мощным двигателем может затормозить свое падение на центр Метагалактики и даже остановиться и повиснуть где-нибудь, выключив себя из циклической динамики поля галактик.

Это гипотеза, которая должна быть проверена более детальным моделированием. Тем не менее, не исключено, что на краю нашей Вселенной может существовать лимбовая зона, в которой практически нет вещества, кроме гравитационных волн и фотонов, но где может уцелеть цивилизация, обладающая материальными ресурсами и необходимой мобильностью. Писатели-фантасты могли бы назвать эту зону «сферой богов».

*) Этот момент, видимо, будет характеризоваться мощным гравитационным линзированием, связанным с искривлением траекторий фотонов звездного света возле поверхности Шварцшильда. Например, звезды той половины земного неба, откуда приближается поверхность дыры, исчезнут, а звезды второй половины неба соберутся в противоположную точку небосклона, к которой движется поверхность дыры. Еще более впечатляющее зрелище будет, если Солнце или Луна окажется на кратчайшей линии между Землей и поверхностью Шварцшильда. Тогда лунный или солнечный диски сильно исказятся: они даже могут быть многократно увеличены по сравнению с обычными размерами. Так как яркость солнечного диска при этом упадет, земляне смогут без всяких телескопов, с помощью гравитационной линзы от БЧД, увидеть солнечные пятна и протуберанцы или лунные горы с кратерами.

Подчеркнем, что в умозрительных рассуждениях последней главы 21 мы нигде не вводим ранее неизвестных физических сущностей, полей или элементарных частиц. Все наши умопостроения относятся к хорошо известным объектам, волнам и частицам: черным дырам, гравитационным волнам, фотонам и барионам, которые можно исследовать в рамках надежно установленных и подтвержденных теорий – ОТО и квантовой механики. Поэтому наши размышления можно рассматривать лишь как прелюдию к постановке научных задач, которые можно решить, опираясь на проверенные теории. Хотя безудержное фантазирование в науке имеет свои положительные эмоциональные стороны, но оно легко выводит за рамки науки. Как писал академик Зельдович в журнале «Природа» в 1983 году: «Другая часто упоминаемая идея – это антропоцентристский принцип, согласно которому существует много вселенных, и мы живем в той из них, которая оказалась пригодной для зарождения жизни... Но тут мы рискуем быстро перейти от науки к размахиванию руками».

Заключение

Авторитет человека не может обосновать истину... истина выше человеческого авторитета...

Карл Поппер (1963)

Вселенная значительно переживет его — он всегда знал это. Но он каким-то образом полагался на вечность, на ее существование, даже если его не приглашали участвовать в ней. Ускоряющееся расширение Вселенной обрекало окружающее пространство на жестокое разобщение и позорную кончину. Вечные гипотетические структуры - Бог, Рай, внутренний нравственный закон - теперь совершенно

не имели опоры. Все растает. Он, не мистик, всегда находил тайное утешение в мысли о вселенском пульсе, чередующемся Большом взрыве и Большом схлопывании, каждый раз переплавляющем материю в невообразимо маленькой печи, в субатомной точке нового начала. Теперь это утешение было у него отнято, и он прочно погрузился в лихорадку отчуждения, едва заметную для окружающих — депрессию.
Джон Андайк «Ускоряющееся расширение Вселенной» (2004)

Суть космологической революции XXI века - смена модели одноразовой непрочной Вселенной, тлеющие обломки которой разлетаются по бесконечной холодной пустыне, на циклическую космологию, которая описывает мощную и надежную пульсацию вечно молодой Вселенной-феникса.

История науки свидетельствует, что крушения теорий являются нормой: в свое время, невзирая на отчаянные усилия алхимиков и ученых адептов, вымерли теории философского камня, флогистона и эфира. Забавно, что «квинтэссенция», термин средневековых алхимиков, широко используется и в современной инфляционной космологии. В настоящее время, под давлением новых наблюдательных данных, экзотические гипотезы о квантовой природе Вселенной вызывают все большее разочарование, поэтому космология возвращается в рамки традиционной физики, где царит суровая бритва Оккама.

Альберт Эйнштейн полагал, что наша Вселенная стационарна и замкнута. Такая модель, по его мнению, была эстетична. Александр Фридман показал, что Вселенная неустойчива и должна расширяться или пульсировать. Считается, что в этом споре Фридман победил Эйнштейна. На самом деле, они оба оказались правы.

Георгий Гамов сыграл огромную роль в углублении концепции циклической Вселенной и предсказал реликтовое излучение, поэтому рассматриваемую в данной книге Λ CDM-космологию можно назвать космологией Эйнштейна-Фридмана-Гамова. Но в эту теорию внесли свои усилия многие авторы и

научные группы, которые решили разные части головоломки. В итоге сложилась удивительная, но глубоко логичная картина Вселенной. Она заключается в том, что Вселенная, как и предполагал Эйнштейн, замкнута или расположена в стационарной черной дыре с радиусом порядка триллиона световых лет. Ее можно назвать Мегадырой. Внутри нее расширяется наблюдаемая нами часть Вселенной (Метагалактика), диаметр которой сейчас достигает примерно ста миллиардов световых лет. А в самом центре нашего мира растет Большая Черная Дыра, образованная при коллапсе Вселенной предыдущего цикла. Она пока вряд ли больше миллиарда световых лет, но быстро увеличивается, поглощая реликтовые гравитационные волны. Поэтому сейчас наш Млечный Путь и разбегающееся поле наблюдаемых галактик находится между двумя поверхностями черных дыр – внешней Мегадыры и внутренней Большой Черной Дыры, размеры которых различаются на 3 порядка. Через 50-100 миллиардов лет Большая Черная Дыра догонит нас, проглотит и обратит расширение Вселенной в сжатие. При этом с нашими галактиками ничего драматического не будет, просто их красное смещение сменится на голубое. Сама Большая Дыра уйдет на периферию мира и сольется с Мегадырой (или станет ею). Пройдет еще 50-100 миллиардов лет до того момента, когда наблюдаемая часть Вселенной сожмется в огненный шар с диаметром примерно в десять световых лет. Там возникнет новая Большая Черная Дыра размером около светового года, а остальная часть шара сжатой Вселенной будет разбросана антигравитацией, вызванной генерацией гравитационного излучения и уменьшением гравитационной массы из-за массового слияния черных дыр, – начнется новый Большой взрыв и стадия расширения.

Таким образом, непротиворечивая модель циклической Вселенной может быть построена только из черных дыр, гравитационных волн и небольшой примеси обычной материи, из которой состоят все звезды, планеты и живые существа (илл.16). Наша Вселенная – это стационарная вселенная Эйнштейна, в которой бьется беспокойное сердце вселенной Фридмана. Анализ популяции черных дыр показывает, что циклов у Вселенной было, как минимум, около тысячи, но, вероятно, гораздо больше.

Вселенная представляет собой маятник с перетеканием энергии между главными компонентами – негравитирующими гравволнами и гравитирующими черными дырами, что приводит к периодическому изменению общей гравитационной массы Вселенной. Она действительно оказалась бессмертным кантианским фениксом, который ухитряется восставать из пепла, даже состоящего из неуничтожимых черных дыр. Циклическая космология объясняет механизм накопления темной материи в виде черных дыр, а также решает загадку раннего происхождения сверхмассивных, в миллиарды масс Солнца, черных дыр в центрах галактик. Для циклической Вселенной существует элегантное решение проблемы роста энтропии, которое тесно связано с судьбой непрерывно растущей Большой Черной Дыры.

Все основные детали этого сценария получили строгое математическое обоснование, в том числе, и в работах автора данной книги, опубликованных в ведущих астрономических журналах мира и России. В обсуждаемой модели циклической Вселенной нет ни одного экзотического предположения или выдуманной сущности, вроде новых полей, размерностей или гипотетических частиц, и нет ни одной нерешенной принципиальной проблемы – такой как гравитационная сингулярность или накопление энтропии от цикла к циклу. Циклическая космология основана исключительно на известных фактах и на проверенных физических теориях, в первую очередь – на общей теории относительности. Пульсирующая Вселенная не нуждается в поддержке гигантских черепах или любых других гипотез *ad hoc*, она базируется на неизбежной логике, ОТО и ядерной физике.

Ригористам, который сочтут трактовку гравитационной энергии, которая принадлежит Эйнштейну, Эддингтону и Шредингеру, новым предположением, можно возразить, что это предположение далеко не ново в ОТО, и новым является лишь его применение в космологии, тем самым, эта трактовка не является предположением *ad hoc*, то есть принятым специально для решения каких-то проблем конкретных моделей. Безусловно, новая теория должна содержать какой-то новый элемент, чтобы получить результаты, отличные от выводов старой теории. То, что новым элементом в циклической космологии оказалась

известная, но малоизученная трактовка фундаментальной общей теории относительности, принадлежащая самому создателю ОТО, является плюсом новой космологии, которая не использует каких-либо гипотез о феноменах, проявляющихся только во Вселенной и нигде больше.

В таблице V в конце Заключения суммируются основные проблемы космологии и ответы на них с точки зрения модели циклической Вселенной и инфляционной теории одноразовой Вселенной. Видно, что число гипотетических полей и сущностей, введенных квантовыми космологами, сопоставимо с числом космологических проблем, которые нужно решить. Для любого непредвзятого ученого очевидна значимость того, что циклическая космология, не вводящая никаких гипотетических сил и построенная лишь на ОТО и реальных фактах, смогла объяснить столь широкий круг наблюдаемых феноменов, и обещает в будущем охватить еще большее число явлений. Это означает, что циклическая космология открывает верный путь к познанию Вселенной, потому что любая ошибочная теория неизбежно сталкивается с непреодолимыми противоречиями на гораздо более ранней стадии сопоставления с наблюдениями.

У циклической космологии немало критиков, указывающих на те, или иные, якобы ошибочные, ее предположения, например, считающих, что мнение Эйнштейна об исключении гравитационной энергии из источников гравитационного поля неверно. Для автора, профессионального физика-теоретика с сорокалетним стажем, очевидно, что на неправильном стартовом предположении нельзя построить столь многогранную теорию, успешно решающую основные космологические проблемы и предсказывающую новые наблюдаемые эффекты.

В таблице VI приведены предсказания циклической космологической модели, которые могут быть подтверждены наблюдениями. Часть предсказаний из периодической модели Вселенной уже подтверждается. Например, консорциумы радиотелескопов в 2020 году открыли гравитационные волны наногерцового диапазона, подтвердив наше предсказание о существовании реликтового фона гравитационных волн, эха от сливающихся при Большом сжатии черных дыр звездных масс.

Возрождающаяся циклическая космология Эйнштейна-Фридмана-Гамова проста и красива, поэтому неизбежно будет прирастать сторонниками и последователями. Можно выделить пять главных теоретических проблем, решения которых послужат дальнейшему развитию космологии периодической Вселенной:

1. Получение модифицированной метрики Шварцшильда для переменной гравитационной массы в приближении сильного поля.
2. Изучение динамики вещества внутри черной дыры. Как сливаются черные дыры с точки зрения падающего наблюдателя? Маленькая черная дыра, попав внутрь большой дыры, должна сохраниться в виде черной дыры. В каких случаях (слияние дыр, сопоставимых по массе?) можно говорить о слиянии содержимого двух черных дыр (и объединения их горизонтов)? Что происходит, когда волна антигравитации из центра черной дыры приближается изнутри к сфере Шварцшильда? Может ли черная дыра в этом случае взорваться (разомкнуться) для внутреннего наблюдателя? Будет ли этот взрыв наблюдаем для внешнего наблюдателя?
3. Построение детальной модели эволюции черных дыр и нейтронных звезд в циклической Вселенной, включая формирование шаровых скоплений из черных дыр. Как сливаются черные дыры и генерируются гравитационные волны в момент максимального сжатия Вселенной? Особенно интересно, как меняется в этот момент популяция сверхмассивных дыр, которая эволюционирует быстрее всех?
4. Моделирование эволюции и накопления реликтовых гравитационных волн в циклической Вселенной.
5. Создание теоретических моделей всех анизотропных и неоднородных наблюдаемых феноменов циклической космологии, в которой есть центр Вселенной.

Можно также сформулировать пять главных перспективных направлений для космологических наблюдений:

1. Наблюдения всех возможных проявлений глобальной анизотропии и неоднородности Вселенной. Определение направления на центр Вселенной.
2. Изучение фона реликтовых гравитационных волн, в первую очередь – возможного падения амплитуды гравитационного излучения для периодов колебаний меньше года.
3. Получение детального распределения черных дыр и их свойств (масс, скорости вращения, распределения в пространстве) с целью доказательства их реликтовости.
4. Поиск шаровых скоплений, состоящих из черных дыр.
5. Обнаружение реликтовых нейтронных звезд.

Мы надеемся, что данная книга поможет молодым теоретиками и наблюдателям выбрать интересные темы для своих исследований, а всем любителям астрономии – насладиться красотой вечно живой и пульсирующей Вселенной.

Таблица V. Основные космологические проблемы и ответы: точки зрения различных теорий

Космологическая проблема	Циклическая модель Вселенной	Квантовая инфляционная теория
Неизвестный механизм Большого взрыва	Антигравитация в ОТО из-за сброса массы сливающихся ЧД в энергию гравволн	Антигравитация из-за гипотетического квантового поля «инфлатон»
Высокая однородность реликтового излучения и самой Вселенной	Ускоренное расширение ранней Вселенной из-за антигравитации в ОТО	Ускоренное расширение ранней Вселенной из-за гипотетического инфлатона
Природа темной материи	Реликтовые черные дыры, в основном, звездных масс	Гипотетические элементарные частицы ВИМП
Причина современного ускоренного расширения Вселенной	Гипергравитация в ОТО из-за роста ЧД при поглощении фоновых гравволн	«Темная энергия», например, гипотетическое отрицательное давление квантового вакуума
Неизбежность гравитационной сингулярности	Антигравитация в ОТО предотвращает сжатие системы в сингулярность	Нет решения. Надежда на гипотетическую квантовую теорию гравитации
Примерное равенство темной материи и темной энергии	Обе эти величины генетически связаны с черными дырами	Гипотетическая связь между квантовыми свойствами вакуума и количеством ВИМПов
Проблема точной подгонки начальных условий расширения	Нет такой проблемы. Вселенная никогда не расширялась из квазиточки.	Гипотеза «мультивселенной» и применение антропного принципа к множеству ($\sim 10^{500}$) вселенных
Существование многих сверхмассивных ЧД в ранней Вселенной	Это реликтовые сверхмассивные ЧД из предыдущих циклов	Образование сверхмассивных ЧД из флуктуаций гипотетических (квантовых) полей

Бесконечный рост энтропии в циклах	Сброс энтропии внутри Большой ЧД	Нет такой проблемы из-за однородности Вселенной
Открытие признаков замкнутости Вселенной	Циклическая Вселенная должна быть замкнута.	Противоречит бесконечному разлету инфляционной Вселенной
Неоднородность постоянной Хаббла	Согласуется с неоднородной циклической Вселенной	Противоречит инфляционной модели однородной Вселенной
Анизотропия постоянной Хаббла	Согласуется с анизотропной циклической Вселенной	Противоречит инфляционной модели изотропной Вселенной
Существование фона наногерцовых гравволн	Результат массового слияния ЧД при сжатия Вселенной	Флуктуации гипотетических полей; излучение двойных ЧД
Модель формирования галактик	Модель аккреции галактик вокруг сверхмассивных ЧД (SMBH), подтверждающаяся наблюдениями	Иерархическая модель слияния мелких и ранних протогалактик, противоречащая современным наблюдениям
Соотношение Талли-Фишера для галактик	Результат взаимодействия галактик с SMBH со средой	Нет решения в рамках инфляционной теории
Соотношение М-сигма для галактик	Результат роста галактик вокруг затравочных SMBH	Нет решения в рамках инфляционной теории

Таблица VI. Основные проверяемые выводы из циклической космологии

<i>Выводы из циклической космологии, которые проверяются наблюдательно</i>	<i>Статус наблюдательного подтверждения</i>
1. Темная материя состоит из черных дыр, собранных в невидимые шаровые кластеры. Теория приводит к определенному виду распределения дыр по массам.	Эта концепция темной материи получила широкое распространение после открытия LIGO большого количества черных дыр. Теоретическое распределение соответствует наблюдательным данным.
2. Часть темной материи может состоять из реликтовых нейтронных звезд	Предсказание нуждается в проверке, но уже есть косвенные признаки таких реликтов.
3. Существует фон реликтовых гравволн от слияния дыр звездных масс при Большом Сжати. Спектр гравволн должен иметь провал после частоты 1/год. Реликтовые слияния SMBH должны вызывать волны с частотой в миллионы раз меньше.	Консорциум NANOGrav и PPTA сообщили об открытии фоновых гравитационных волн ожидаемой наногерцовой частоты. Провал амплитуды волн после частоты 1/год нуждается в дальнейшей проверке. Наличие сверхдлинных волн от реликтового слияния SMBH нуждается в проверке.
4. SMBH являются затравками для аккреционного образования галактик. Двумерная аккреция порождает спиральные галактики, трехмерная – эллиптические.	Аккреционная модель образования галактик вокруг SMBH активно вытесняет устаревшую иерархическую модель. Связь геометрии аккреции с типом галактик требует подтверждения.
5. Относительная скорость SMBH и газа вызывает анизотропию направления осей вращения центральных дисков вокруг SMBH и галактик.	Анализ углового распределения галактических радиоджетов показывает квадрупольную асимметрию их направлений. Необходима дальнейшая проверка данного феномена.

Литература

Список основных использованных трудов на русском и на английском языках. Для некоторых работ указан год самого раннего издания. Дополнительные списки литературы приведены в конце Приложений I и II.

«Альберт Эйнштейн и теория гравитации», М.: Мир, 1979.

Амирханян В. Р. «Анизотропия пространственной ориентации радиоисточников. II: Функция распределения осей», Астрофизический бюллетень, т.54, N4, с.350-356, 2009.

Вайнберг С. «Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной», М.: Энергоиздат, 1981.

«Вопросы космогонии», том. IX, Издательство Астросовета АН СССР, М., 1963.

Горькавый, Н.Н. «Самоорганизация Солнечной системы», Научные информации Астросовета АН СССР, вып.68, стр.66-71, 1990.

Горькавый, Н.Н. и Фридман, А.М. «Физика планетных колец. Небесная механика сплошной среды», М.: Наука, 1994.

Горькавый, Н.Н. и Тюльбашев, С.А. «Черные дыры и нейтронные звезды в осциллирующей Вселенной», Астрофизический бюллетень, т.76, N3, с.285-305, 2021.

Дикке, Р., «Gravitational Theory and Observation». Physics Today, 1967; (Эйнштейновский сборник 1969-1970)

Дикке, Р. «Гравитация и Вселенная», М.: Мир, 1972.

Долгов, А.Д., Зельдович, Я. Б., Сажин, М. В. «Космология ранней Вселенной». М.: МГУ, 1988.

Долгов, А.Д. «Массивные и сверхмассивные черные дыры в современной и ранней Вселенной и проблемы космологии и астрофизики», УФН, 188,121-142, 2018.

Диоген Лаэртский. «О жизни, учениях и изречениях знаменитых философов». М.: Мысль, 1986.

Зельдович, Я.Б. «Горячая» модель Вселенной», УФН, 89, 647-668, 1966.

Зельдович, Я. Б. и Новиков, И. Д. «Релятивистская астрофизика», М.: Наука, 1967.

Зельманов, А.Л. и Агаков, В.Г. «Элементы общей теории относительности». М.: Наука, 1989.

Кант, И. (1755) «Всеобщая естественная история и теория неба», Собр. соч. в 8-ми томах, Чоро, т. 1, 1994.

Клиффорд, Уильям (1885) «Здравый смысл точных наук». М.: Изд. Сытина, 260 с., 1910.

Кун, Т. «Структура научных революции», М.: Прогресс, 1970.

Ландау, Л.Д., и Лифшиц, Е.М. «Теория поля», М.: Наука, 1973.

Лифшиц, Е.М. и Халатников, И.М. «Проблемы релятивистской космологии», УФН, 80, стр. 391-438, 1963.

Максвелл, Дж. К. (1873) «Трактат об электричестве и магнетизме». Собрание сочинений, М.: Наука, т.2, 1989.

Меллер, К. «Теория относительности». М.: Атомиздат, 1975.

Мизнер, Ч., Торн, К., Уилер, Дж. (1973) «Гравитация», М.: Мир, т.1-3, 1977.

Мицкевич, Н.В. «Физические поля в общей теории относительности», М.: Наука, 1969.

Новиков, И.Д. «Эволюция Вселенной», М.: Наука, 1983.

Новиков, И. и Фролов, В. «Физика черных дыр», М.: Наука, 1986.

Николис, Г. и Пригожин, И. «Познание сложного», М.: Мир, 1990.

Пайс, А. «Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна», М.: Наука, 1989.

Паули, В. (1921) «Теория относительности», М.: Наука, 1983.

Пенроуз, Р. «Структура пространства-времени», М.: Мир, 1972.

Пенроуз, Р. «Новый ум короля. О компьютерах, мышлении и законах физики», М.: УРСС, 2003

Поляченко, В.Л. и Фридман, А.М. «Устойчивость гравитирующих систем», М.: Наука, 1976.

Поппер, К. «Предположения и опровержения», М.: АСТ, Ермак, 2004.

Пригожин, И. «Эйнштейн, триумфы и коллизии», в сб. Эйнштейновский сборник, 1978-1979, М.: Наука, 1983.

Пригожин, И. и Стенгерс, И. «Порядок из хаоса», М.: Прогресс, 1986.

«Проблемы гравитации». Труды V международной конференции по гравитации и теории относительности. Тбилиси, Изд. Тбилисского Университета., 1976.

«Прошлое и будущее Вселенной», Ред. А.М. Черепашук, М.: Наука, 177 с., 1986.

Родичев, В.И. «Теория тяготения в ортогональном репере», М.: Наука, 1974.

Рис, М., Руффини, Р., Уилер, Дж. «Черные дыры, гравитационные волны и космология». М.: Мир, 1977.

Сажин, М.В. «Возможности детектирования сверхдлинных гравитационных волн», *Астрономический журнал*, т.55, стр. 65-68, 1978.

Сажин, М.В. «Современная космология в популярном изложении», М.: УРСС, 167 с., 2002.

Сахаров, А.Д. «Научные труды». М.: Центрком, 1995.

Силк, Дж. «Большой взрыв». М.: Мир, 1982.

Сильченко, О. «Происхождение и эволюция галактик», Век2, Фрязино, 2017.

Синг, Дж. «Общая теория относительности». М.: ИЛ, 1963,

Спиноза, Б. «Избранное», Минск, Попурри, 592 с., 1999.

«С чего началась космология»/Ред. В.И. Мацарский, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», М.-Ижевск, 2014.

Толмен, Р. (1934) «Относительность, термодинамика и космология», М., Наука, 1974.

Тоннела, М.-А. «Основы электромагнетизма и теории относительности». М.: ИЛ., 1962.

Уилер, Дж. «Гравитация, нейтрино и Вселенная», М.: ИЛ., 1962.

Фок, В.А. «Теория пространства, времени и тяготения», М.: ГИФМЛ, 1961.

«Фрагменты ранних греческих философов». Часть 1. М.: Наука. 1989

Фридман, А.А. (1922) «О кривизне пространства». В сб.: Альберт Эйнштейн и теория гравитации. М.: Мир, стр. 320-329, 1979.

Хокинг, С. «От большого взрыва до черных дыр. Краткая история времени». М: Мир. 1990.

Хоссенфельдер, С. «Уродливая вселенная: как поиски красоты заводят физиков в тупик» М.: Бомбора, 2020.

Хриплович, И. Б. «Общая теория относительности» М: Инст. Комп. Иссл., 2002.

Черепашук, А.М. «Черные дыры в двойных звездных системах и ядрах галактик», УФН, 184, 387-407, 2014.

Черепашук, А.М. и Чернин, А.Д. «Вселенная, жизнь, черные дыры», Век2, Фрязино, 2003.

«Черные дыры», М.: Наука, 1978.

Шредингер, Э. (1950) «Структура пространства-времени». В: «Пространственно-временная структура Вселенной». М.: Наука, ГИФМЛ., 1986.

Шредингер, Э. (1956) «Расширяющиеся Вселенные». там же.

Эддингтон, А.С. (1922) «Теория относительности», Л.-М. ОНТИ-ГТТИ, 1934.

Abbot, B.P., et al. “Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger”, Phys. Rev. 116, 061102, 2016.

Anderson, Ph. W. “Four Last Conjectures”, <https://arxiv.org/abs/1804.11186>, 2018

Antoniadis, J. et al. “The International Pulsar Timing Array second data release: Search for an isotropic gravitational wave background” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 510 (4): 4873-4887, 2022.

Arzoumanian, Z., Baker, P., Blumer, H., et al. (The NANOGrav Coll.), “The NANOGrav 12.5 yr Data Set: Search for an Isotropic Stochastic Gravitational-wave Background” *Astrophys. J. Letters*, 905, L34, 2020.

Asimov, I. “The collapsing universe. The story of black holes”, NY, Pocket books, 1978.

Banks, T., and Fischler, W. «Black Crunch», <https://arxiv.org/abs/hep-th/0212113>, 2002.

Bischetti, M., Feruglio, C., D’Odorico, V., et al. “Suppression of black-hole growth by strong outflows at redshifts 5.8–6.6” *Nature*, 605, 244–247, <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04608-1>, (2022).

Carr, B. J. and Coley, A. A. “Persistence of black holes through a cosmological bounce”. *International Journal of Modern Physics D*, Vol. 20, No. 14, pp. 2733-2738, 2011.

Carroll, S.M. "Why is the Universe Accelerating?" In: *Measuring and Modeling the Universe*, ed. W. L. Freedman, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004.

Chirenti, C., Dichiara, S., Lien, A. et al. “Kilohertz quasiperiodic oscillations in short gamma-ray bursts”. *Nature*, 613, 253–256, 2023.

Coles, P. and Ellis, G.F.R. “Is the Universe open or closed? The Density of Matter in the Universe” Cambridge Univ. Press., Cambridge, 1997.

“Cosmology, Fusion & Other Matters. George Gamov Memorial Volume” Ed. F. Reines, Colorado Univ. Press, 1972.

Creswell, J. and Naselsky, P. “Ring of attraction: overlapping directions of the dipole modulation of the CMB, the parity asymmetry, and kinematic dipole percolation zone” <https://arxiv.org/abs/2105.08658>, 2021.

Davis, P. “The Last Three Minutes”, Basic Books, 1994.

Di Valentino, E., Melchiorri, A., and Silk, J. "Planck evidence for a closed Universe and a possible crisis for cosmology", *Nature Astronomy*, 4, 196–203, 2020.

Eddington, A. (1933) "The Expanding Universe", Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1988.

Ellis, G.F.R., Maartens, R., MacCallum, M.A.H. "Relativistic cosmology", Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2013.

Evans, D.S. "The Eddington Enigma". Xlibris Corp., 1998.

Gamov, G. (1952), "The Creation of the Universe", NY, The Viking Press, 1953.

Gorkavyi, N. "Origin and Acceleration of the Universe without Singularities and Dark Energy". *Bulletin of the American Astronomical Society*, 35, #3, 2003.

<http://www.aas.org/publications/baas/v35n3/aas202/404.htm>

Gorkavyi, N., "Acceleration of the Universe with Variable Gravitational Mass". *Proceedings of A Workshop on Studies of Dark Energy and Cosmology from X-ray Cluster Surveys*, January 15-16, Greenbelt, MD, 2004.

Gorkavyi, N. "Dark Energy and Dark Matter Phenomena and the Universe with Variable Gravitational Mass", *Bull. AAS*, 207th Meeting Abstract, 2005.

<http://www.aas.org/publications/baas/v37n4/aas207/4107.htm>

Gorkavyi, N., Vasilkov, A. "A repulsive force in the Einstein theory". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 461 (3): 2929-2933, 2016.

Gorkavyi, N., Vasilkov, A. "A modified Friedmann equation for a system with varying gravitational mass". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 476 (1): 1384-1389, 2018.

Gorkavyi, N., Vasilkov, A., Mather, J., “A Possible Solution for the Cosmological Constant Problem”, In: Exploring the Dark Side of the Universe. Eds: B. Vachon and P. Petroff, PoS(EDSU2018)039, <https://pos.sissa.it/335/039/pdf>, 2018.

Gorkavyi, N. "Gravitational wave background discovered by NANOGrav as evidence of a cyclic universe", *New Astronomy*, 91: 101698, 2022.

Gorkavyi, N. “Accretion of Galaxies around Supermassive Black Holes and a Theoretical Model of the Tully-Fisher and M-Sigma Relations” *Galaxies*, 10: 73, 2022.

Gurzadyan, V.G., Penrose, R. “On CCC-predicted concentric low-variance circles in the CMB sky”. *Eur. Phys. J. Plus*, 128, 22, 2013.

Guth A. H., “Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems” *Phys. Rev. D*, 23, 347, 1981.

Guth, A.H. “The Inflationary Universe. The quest for a new theory of cosmic origins”, Cambridge, MA, Helix Books, Perseus Books, 1997.

Hawking, S.W. “Black hole explosions?” *Nature*, 248: 30-31, 1974.

Hawking, S.W., and Penrose, R., “The singularities of gravitational collapse and cosmology” *Proc. Royal Soc.London Ser. A* 314 (1519), 529, 1970.

Hergt, L. T., Agocs, F. J., Handley, W.J., Hobson, M.P., Lasenby, A.N. "Finite inflation in curved space", <https://arxiv.org/abs/2205.07374>, 15 May, 2022.

Hoyle, F. “The Nature of the Universe”, A Mentor Book. 1950.

Ijjas, A., Steinhardt, P.J. and Loeb, A. "Cosmic Inflation Theory Faces Challenges", *Scientific American*, February 2017

Jerome, F. “The Einstein file”, St. Martin Press, 2002.

Kashlinsky, A., “LIGO Gravitational Wave Detection, Primordial Black Holes, and the Near-IR Cosmic Infrared Background Anisotropies”, *Astrophys. J.* 823 (2), L25, 2016.

Land, K., and Magueijo, J. "Examination of Evidence for a Preferred Axis in the Cosmic Radiation Anisotropy", *Phys. Rev. Lett.* 95, 071301, 2005.

Mather, J. and Boslough, J., “The Very First Light”. NY, Basic Books, 2008.

Migkas, K. et al "Probing cosmic isotropy with a new X-ray galaxy cluster sample through the L_X -T scaling relation", *Astronomy & Astrophysics*, 636, A15, 2020.

Peebles, P.J.E., «Principles of Physical Cosmology», Princeton Univ. Press., Princeton, 1993.

Peebles, P.J.E., and Yu, J.T. “Primeval adiabatic perturbation in an expanding universe”, *ApJ*, 162: 815-836, 1970

Penrose, R. “Cycles of times”, NY, Alfred A. Knopf, 2011.

Perlmutter, S. “Supernovae, Dark Energy, and the Accelerating Universe”. *Physics Today*, April. p.53-60, 2003.

Powell, C. «The Man in the Equation», *Discover*, v. 23, N 12, стр. 82-83, 2002

Rees, M.J. “Before the Beginning. Our Universe and others”. Helix Books, Perseus Books, Cambridge, Massachusetts, 1997.

Riess, A.G. et al "Cosmic Distances Calibrated to 1% Precision with Gaia EDR3 Parallaxes and Hubble Space Telescope Photometry of 75 Milky Way Cepheids Confirm Tension with Λ CDM", *Astrophys. J. Lett.* 908: L6, 2021.

Rubin, V. “Bright Galaxies Dark Matters”, American Institute of Physics, Woodberry, NY, 1997

Russel, B. "The ABC of Relativity", Signet Science Library, 1962.

Secrest, N., von Hausegger, S., Rameez, M., Mohayae, R., Sarkar, S., Colin, J. "A Test of the Cosmological Principle with Quasars", *Astrophys. J. Lett.* 908, L51, 2021.

Schneider, P. "Extragalactic Astronomy and Cosmology. An Introduction", 2 Ed., Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2015.

Silk, J. "The Big Bang". W.H. Freeman and Company, N.Y., 2001.

Smolin, L. "The trouble with physics", Boston, NY, Houghton Mifflin Co., 2006.

Steinhardt, P.J. and Turok, N. "The cyclic Universe: An Informal Introduction", *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* 124: 38-49, 2003.

Sunyaev, R. A. and Zeldovich, Ya. B. "Small-scale fluctuations of relic radiation", *Astrophysics and Space Science*, 7: 3-19, 1970.

Taylor, M.A., Puzia, T.P., Gomez, M., and Woodley, K.A., "Observational Evidence for a Dark Side to NGC 5128's Globular Cluster System", *Astrophys. J.* 805 (1), 65-85, 2015.

"The Future of Spacetime", NY-London, W.W. Norton & Company, 2002.

Thorne, K.S. "Black holes & time warps. Einstein's outrageous legacy". NY-London, W.W. Norton & Company, 1994

Tiwari, P., Kothari, R., and Jain, P. "Superhorizon Perturbations: A Possible Explanation of the Hubble–Lemaître Tension and the Large-scale Anisotropy of the Universe", *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 924, Number 2, L36, 2022.

Tourenco, Ph. "Relativity and Gravitation", Cambridge Univ. Press., 1997.

Weyl, H. (1918) "Space-Time-Matter", Dover Publications, 1952.

Wheeler, J.A., Ford, K. "Geons, Black Holes & Quantum Foam", NY-London, W.W. Norton & Company, 1998.

Woit, P. "Not even wrong. The failure of string theory and the search for unity in physical law", NY, Basic books, 2006.

Zhao W., Santos L. "Preferred axis in cosmology", <https://arxiv.org/abs/1604.05484>, 2016.

*Разбегались галактики, тлели светила,
Словно угли в жаровне под жарким дыханьем,
Было утро Вселенной, и мир расширялся,
И летели гонцы на восток и на запад,
И на юг, и на север,
И звездные зовы
Вдаль манили,
И не было свету предела.*

*Но одна только звездочка тихо грустила,
Потому что, разумной, ей было известно, —
Что Вселенная вскорости станет сжиматься,
Словно мяч, из которого выпущен воздух.*

Владимир Михановский, «Двойники» (1968)

Приложение I. Проблема гравитационной энергии в теории Эйнштейна

Прослеживание процесса становления теории по оригинальным работам само по себе является привлекательным, и нередко такое изучение источников позволяет глубже постичь существо дела, чем систематическое приглаженное изложение современного состояния теории в ее завершенном виде, которое можно найти в работах многих наших современников. Именно поэтому я надеюсь, что предлагаемое вниманию читателя собрание научных трудов обогатит специальную литературу.

А. Эйнштейн, из предисловия к его единственному прижизненному собранию сочинений (на японском языке).

По распространенному мнению, создание общей теории относительности (ОТО) Альберта Эйнштейна датируется 1915 или 1916 годом. На самом деле, теорий гравитаций у Эйнштейна было несколько. Они сменяли друг друга и совершенствовались вместе с развитием его взглядов. При этом нужно разделять эволюцию математического вида основных уравнений общей теории относительности и углубление их физической интерпретации. Трактовка любой теории всегда более деликатна и продолжительна, чем прогресс математического аппарата. Изучая эволюцию взглядов Эйнштейна, стоит обратить особое внимание на проблему нетензорности энергии-импульса гравитационного поля, которая до сих пор рассматривается многими как трудность ОТО и вызывает массу споров. Ключевым является вопрос: насколько реальна гравитационная

энергия и является ли она источником дополнительного гравитационного поля?

Эйнштейн занимался теорией гравитации почти пятьдесят лет и интересно отследить изменение взглядов создателя ОТО за это время. Для анализа развития взглядов Эйнштейна мы будем использовать около 250 монографий по гравитации и космологии из личной библиотеки автора (см. иллюстрацию 14), в первую очередь:

- 4-х томное собрание сочинений Эйнштейна, выпущенное издательством «Наука» в 1965-1967 годах в Советском Союзе, на которое будем ссылаться как на Собрание сочинений Эйнштейна или ССЭ [1-4],

- рекордно медленно выходящее 25-ти томное принстонское собрание трудов Эйнштейна, которое будем обозначать как ПСЭ. В рамках этого проекта с 1987 по 2018 год было издано 15 томов. Активнее всего мы будем использовать тома 7-10, где опубликованы труды и письма Эйнштейна за 1914-1920 годы [5-8].

Первые два тома ССЭ содержат 147 статей Эйнштейна по теории относительности, рассортированных по годам. Это практически полный набор научных работ Эйнштейна в области теории относительности, хотя ряд интересных публикаций общего характера содержится и в четвертом томе ССЭ. ПСЭ не вносит дополнительного вклада в список опубликованных научных работ Эйнштейна, но тома английского издания содержат много интересных писем, которыми создатель теории относительности обменивался с друзьями и коллегами.

Мы будем обращаться ко всем другим доступным источникам эйнштейновских писем и текстов, например, к 14-ти «Эйнштейновским сборникам», выпущенных издательством «Наука» в 1966-1985 годах (будем обозначать эти сборники как ЭС) [9]. В свой обзор мы включим и труды выдающегося эйнштейнианца - А.С. Эддингтона, опубликованные на русском и на английском языках [10-13], а также ряд работ Шредингера и других ученых [14-34].

1. Статьи Эйнштейна по гравитации до 1916 года.

***Говорят, что непреодолимой
нековариантностью результатов
ОТО, природа, на языке анализа,
нам все время хочет что-то
сказать, но мы никак не можем
понять, что именно.
В.И. Родичев (1974)***

В 1912 году в работе «К теории статического гравитационного поля» Эйнштейн вводит (как он полагает - в соответствии с законом сохранения энергии) положительную плотность энергии гравитационного поля (ССЭ, т.1, стр. 214). Здесь физик Эйнштейн вступает в противоречие с ньютоновским законом сохранения, который предполагает отрицательность гравитационной энергии. Поступок Эйнштейна можно понять, потому что отрицательная энергия является понятием, которое противоречит здравому смыслу.

В 1913 году Эйнштейн, вместе с математиком М. Гроссманом, публикует обширный, на 40 страниц, «Проект обобщенной теории относительности и теории тяготения» (ССЭ, т.1, стр. 227), на которую он потом часто ссылается как на теорию тяготения Эйнштейна-Гроссмана. В этой важной статье

1. гравитационное поле впервые определяется метрическим тензором, который характеризует искривленность пространства;
2. искривленность пространства связывается с тензором энергии-импульса, что приводит к верному принципиальному дизайну уравнений поля тяготения.

Новые уравнения гравитации были тензорным обобщением уравнения Пуассона, лежащего в основе ньютоновской теории гравитации (см. начало раздела 9.1 основного текста).

При введении нового уравнения, Эйнштейн, который был автором физической части статьи, строго придерживается закона сохранения энергии, ставшим одной из основ теории. Он выбирает вид тензора, характеризующего искривленность пространства, так, «чтобы выполнялся закон сохранения энергии-импульса». Эйнштейн записывает уравнения гравитационного поля в виде

$$-D_{\mu\nu}(g) = \kappa(t_{\mu\nu} + T_{\mu\nu})$$

где тензор $D_{\mu\nu}(g)$ составлен из вторых производных метрического тензора $g_{\mu\nu}$; $T_{\mu\nu}$ - тензор энергии-импульса материи, а $t_{\mu\nu}$ - тензор энергии-импульса гравитационного поля, который Эйнштейн ввел впервые. В статье отмечено: «Эти уравнения удовлетворяют требованию, по нашему мнению, обязательному для релятивистской теории гравитации; именно, они показывают, что тензор гравитационного поля... является источником поля наравне с тензором материальных систем... Исключительное положение энергии гравитационного поля по сравнению со всеми другими видами энергии привело бы к недопустимым последствиям». Записав аналог закона сохранения энергии-импульса, Эйнштейн заключает: «Отсюда видно, что соотношения для законов сохранения справедливы для вещества и гравитационного поля вместе взятых».

Итак, важное утверждение о равноправии гравитационной и других видов энергии Эйнштейн сделал впервые в 1913 году, а потом часто повторял его. Но 1913 год - год опубликования данной работы - не стал годом рождения общей теории относительности. Уравнения искривления пространства, найденные Эйнштейном на основе требования выполнения закона сохранения энергии, оказались не общековариантными, то есть зависящими от движений наблюдателя. Это случилось, грустно поясняет Эйнштейн в примечании к статье 1913 года, потому что «постулируется соблюдение законов сохранения... для материального процесса и гравитационного поля вместе взятых. Именно из этого постулата... выведены уравнения гравитационного поля». Эйнштейн пессимистично отмечает, что, вследствие необщековариантности законов сохранения, послуживших основой теории, общековариантные уравнения поля «вообще не могут существовать» в данной теории (ССЭ, т.1, стр. 265).

В статье «Физические основы теории тяготения» (1913) Эйнштейн еще раз совершенно четко выражает свою точку зрения на гравитационное воздействие гравитационной энергии: «Из системы уравнений... можно видеть, что наряду с компонентами тензора энергии-натяжений материи (...) в качестве равноценных источников поля выступают также

компоненты тензора гравитационного поля...; это требование, очевидно, необходимо, поскольку гравитационное воздействие системы не может зависеть от физической природы энергии, служащей источником поля» (ССЭ, т.1, стр. 272).

В докладе в Вене «К современному состоянию проблемы тяготения» (1913) Эйнштейн перечисляет «общие постулаты, которые МОЖНО принять (но НЕОБЯЗАТЕЛЬНО все) в теории гравитации:

1. Выполнение законов сохранения импульса и энергии.
2. Равенство ИНЕРТНОЙ и ТЯЖЕЛОЙ масс замкнутых систем.
3. Справедливость теории относительности..., т.е. системы уравнений должны быть ковариантны...относительно линейных... подстановок...» (ССЭ, т.1, стр. 275).

Эйнштейн, обсуждая эти постулаты, пишет: «Все теоретики согласны, что постулат 1 должен выполняться». Обсуждая постулат 2, он отмечает: «...гравитационное дальноедействие системы не меняется, даже если часть энергии системы переходит в гравитационную энергию. Тяготеющая масса системы определяется ее полной энергией, включая ее гравитационную энергию» (там же, стр. 276).

В дискуссии к венскому докладу, Ганс Рейснер, который в будущем получит известное решение уравнений Эйнштейна для электрически заряженного тела, задал пронизательный вопрос, указывающий на внутреннюю противоречивость понятия энергии гравитационного поля. Смысл этого вопроса заключается в следующем: согласно теории Эйнштейна, гравитационном поле является объектом, который воздействует на любой другой объект, обладающий энергией и инерцией, например, на луч света. При этом само гравитационное поле обладает энергией, тяжестью и инерцией. Но тогда поле должно действовать само на себя и «...как получается, что поле остается статическим, хотя полевая энергия пустого пространства подвержена тяжести?» Рейснер отмечает, что полевая энергия пустого пространства представляет собой весьма «особый вид энергии».

В статье «Дополнительный ответ на вопрос Рейснера» (ССЭ, т.1, стр. 299). Эйнштейн соглашается с Рейснером: «...из основных предпосылок теории следовало бы ожидать, что поле

тяжести действует на свои собственные «компоненты энергии» (...), так же, как на соответствующие компоненты энергии материи (...). Интересно, что Эйнштейн берет в кавычки термин «компоненты энергии» для случая гравитационного поля.

В статье 1914 года «Формальные основы общей теории относительности» Эйнштейн еще раз подчеркивает: «...важен вывод, что тензор энергии гравитационного поля так же, как и тензор энергии материи, сам возбуждает поле» (ССЭ, т.1, стр. 377).

Обсудим второй постулат, который стал известен как принцип эквивалентности. Это фундаментальное положение теории Эйнштейна часто оказывается неправильно интерпретированным. В обширной статье 1913 года, со ссылкой на опыты Этвеша, Эйнштейн пишет: «гипотеза эквивалентности, выражающая физическую равнозначность тяжелой и инертной масс, в высшей степени вероятна» (ССЭ, т.1, стр. 228).

Что измерял Этвеш? Он определял отношение притяжения тела к Земле, которое зависит от гравитационной массы тела, к центробежной силе, которое испытывает это тело из-за суточного вращения Земли, а эта сила пропорциональная его инертной массе. Этвеш сравнивал это соотношение для тел разной плотности и химического состава и всегда получал одинаковое соотношение. Что такое гравитационная масса в опыте Этвеша, знает каждый, кто накладывал яблоки на рычажные рыночные весы. А тот, кто крутил на веревочке какой-нибудь груз, прекрасно осведомлен о том, как этот процесс зависит от инертной массы груза. Результат опыта Этвеша был удивительным, ведь гравитационная и инертная массы соответствовали разным характеристикам тела, почему же они оказались совпадающими?

Учтем, что опыт Этвеша интерпретировался в те времена на ньютоновском языке, потому что язык общей теории относительности еще не был создан. Поэтому притягивающее гравитационное поле Земли было в начале XX века таким же физическим, как и веревочка, которая не дает улететь грузу на ее конце. Что сделал Эйнштейн? Он стал интерпретировать равенство инертной и гравитационной масс как свойство кривого пространства, которому было все равно – что движется по его искривленным поверхностям. Эйнштейн в качестве иллюстрации

этого «равнодушия» приводит идею равномерно ускоренного лифта, которым можно заменить гравитацию. Представим, что вы стоите в лифте, который расположен в межзвездном пространстве вдали от Земли, но движется с равномерным ускорением в 9.8 м/с^2 . Если вы прихватили рыночные весы с парой килограмм яблок, то они будут показывать такой же вес, как и на земном рынке. Но ясно, что весы измеряют уже не гравитационную, а инертную массу яблок. Если яблоко скатилось с весов, то оно будет падать на пол с видимым ускорением в 9.8 м/с^2 , но это ускорение никак не зависит от инертных свойств яблока и отражает лишь ускоренное движение лифта.

Эйнштейн сменил парадигму восприятия гравитационного поля: оно перестало быть физическим полем, которое можно было представить набором веревочек. Ускорение, которое придавало телам Земля, стало неускоренным движением тела по геодезической линии в искривленном пространстве. Тем самым, Эйнштейн уничтожил понятие гравитационной и инертной массы в опытах Этвеша, как и физическую значимость их равенства. Да, Эйнштейн положил опыт Этвеша и принцип эквивалентности в основу своей теории, но этот удивительный ньютоновский факт превратился в тривиальное следствие движения в эйнштейновском пространстве. Бабочка Эйнштейна выбралась из кокона Ньютона, оставив лишь сухую скорлупу формального равенства масс. Уничтоженные Эйнштейном массы стали называть «пассивными». «Пассивная гравитационная масса» входит в закон Ньютона в качестве массы пробного тела, «пассивная инертная масса» обеспечивает третий закон Ньютона при гравитационном ускорении тела. Так как никакого гравитационного поля и гравитационной ускорения в теории Эйнштейна нет, то не нужен и баланс ускорений для геодезического движения тела в искривленном пространстве. Естественно, «активные» гравитационная и инертная масса остались: первая входит в закон Ньютона как масса Земли. Это масса, которая не пассивно реагирует на гравитационное поле, а активно порождает его. Активная инертная масса уравнивает в третьем законе Ньютона любые негравитационные ускорения, возникающие хотя бы вследствие кручения груза на веревочке. Активная гравитационная масса

обобщается в теории Эйнштейна в тензор энергии-импульса материи, который стоит в правой части уравнений и служит источником искривленного пространства, которое описывается тензором Эйнштейна в левой части уравнений. Активная инертная масса входит в знаменитый закон $E = mc^2$ и подчиняется закону сохранения энергии. Но разве она тоже не обобщается в тензор энергии-импульса? На первый взгляд, мы снова должны прийти к равенству инертной и гравитационной масс. На самом деле, между ними существует существенная разница, связанная с гравитационными волнами, которую мы обсудим отдельно. Сейчас важно запомнить, что опыты Этвеша не имеют никакого отношения к возможному равенству активной инертной и активной гравитационной массы. Это служит частым источником недоразумений: как только возникает вопрос о соотношении активной инертной и гравитационной масс, даже специалисты начинают утверждать, что это равенство доказано Этвешем и положено Эйнштейном в основу его теории.

Бертран Рассел пишет об этом в своей популярной книге: «Таким образом, когда мы упоминаем «гравитационную массу» в смысле... способности тела реагировать на гравитацию, мы находим, что «равенство инертной и гравитационной масс», звучащее весьма содержательно, сводится к следующему: в данном гравитационном поле все тела ведут себя совершенно одинаково. ... Что же касается гравитационной массы в смысле... интенсивности силы, вызываемой телом, здесь больше нет *точной* пропорциональности его инертной массе» (“The ABC of Relativity”, 1962, p. 89-90). Рассел рекомендует читателю более углубленное изложение в книге А. Эддингтона «Математическая теория относительности». Мы присоединяемся к этой рекомендации мудрого Бертрана Рассела!

1915 год был переломным для развития эйнштейновской теории гравитации. В статье «К общей теории относительности» (ССЭ, т.1, стр. 425) Эйнштейн пишет слова, ставшие широко известными: «я полностью потерял доверие к полученным мной уравнениям поля и... вернулся к требованию более общей ковариантности уравнений поля, от которой я отказался с тяжелым сердцем, когда работал вместе с моим другом Гроссманом». Далее Эйнштейн всегда будет придерживаться этого принципа и довольно быстро установит верный вид

уравнений поля (см. «Уравнения гравитационного поля», ССЭ, т.1, стр. 448, поступила 2 декабря 1915 года.). Сила новых уравнений проявилась в объяснении величины аномального движения перигелия Меркурия (см. «Объяснение движения перигелия Меркурия в общей теории относительности», 1915, ССЭ, т.1, стр. 439), в то время как старые уравнения Эйнштейна не давали такого результата.

В это время Эйнштейн по-прежнему придерживается закон сохранения энергии, но уже не кладет его в основу вывода уравнений поля, а лишь после записи основных уравнений проверяет, чтобы выполнялся закон сохранения, который теперь оказывается следствием уравнений гравитационного поля. При этом он по-прежнему считает, что энергия гравитационного поля сама порождает дополнительное гравитационное поле: «...Выше мы исходили из требования, что энергия гравитационного поля должна действовать в смысле тяготения точно так же, как всякая энергия другого рода.» Эта цитата взята из фундаментальной работы «Основы общей теории относительности», 1916 (ССЭ, т.1, стр. 490), объемом свыше 50 страниц, которая была отправлена в печать 20 марта 1916 года и явилась наиболее полным изложением общей теории относительности (ОТО). Позже она публиковалась как отдельная брошюра. Благодаря этой работе, 1916 год нередко считается годом рождения ОТО. Более того, именно здесь многие историки и физики ставят точку в истории создания общей теории относительности, а некоторые даже считают этот год концом научной карьеры Эйнштейна. На самом деле, к 1916 году были получены лишь основные математические уравнения общей теории относительности, после чего она вступила в сложный и длительный период физической интерпретации полученных уравнений

2. Дискуссии 1916-1918 годов о природе гравитационной энергии

Насколько уравнения Эйнштейна однозначны и обязательны, как с ними работать, каков смысл различных понятий и образов, используемых в общей теории относительности? Всякий... знает как много споров вызывают эти вопросы...

Достаточно напомнить два примера недавнего прошлого: споры о самом существовании и характере гравитационного излучения, а также анализ гравитационного коллапса и решений в области «внутри» шварцшильдовской сферы. ...Собрание трудов Эйнштейна является и надолго останется ценнейшим источником для изучения общей теории относительности, понимания многих ее особенностей и типичных черт.

В.Л. Гинзбург, из рецензии 1968 года на собрание сочинений Эйнштейна на русском языке

Изучим научные публикации Эйнштейна после весны 1916 года. Интересная заметка опубликована Эйнштейном в конце 1916 года (ССЭ, т.1, стр. 505, отправлена в печать 19 октября), как ответ на статью Коттлера [16], который обсуждает общую теорию относительности. Эйнштейн пишет «работа Коттлера особенно замечательна, так как этот ученый действительно проник в сущность теории». Коттлер упрекает Эйнштейна за то, что он интерпретирует члены в своих уравнениях в терминах «силы поля тяжести», что не соответствует духу принципа эквивалентности. Эйнштейн, немного оправдываясь, отвечает: «Названия этих членов, введенные мною, в принципе несущественны и введены исключительно в силу нашей привычки мыслить физически. Это относится в особенности к величинам $\Gamma_{\alpha\beta}^{\nu}$... (компоненты гравитационного поля) и t_{σ}^{ν} (компоненты энергии гравитационного поля). Введение этих величин не является принципиально необходимым, однако мне кажется, что, по крайней мере, временно оно имеет смысл ради поддержания преемственности в мышлении; поэтому я ввел эти величины, хотя они не имеют тензорного характера». Сравним это мнение Эйнштейна с его позицией 1913-1915 года, когда он настаивал на полном равноправии энергии гравполя и энергии обычной материи.

Это показывает, что Эйнштейн уже к концу 1916 года стал рассматривать энергию гравитационного поля своеобразно - как дань традициям. Дальнейшее изменение его отношения к закону

сохранения энергии и к гравитационной энергии как к источнику гравитационного поля видны из популярной книги «О специальной и общей теории относительности», 1917 (ССЭ, т.1, стр. 581, книга послана в печать в декабре 1916 года; цитаты взяты из второго издания 1920 года), где он перечисляет требования к обобщению уравнений гравитационного поля:

«а) искомое обобщение должно также удовлетворять общему принципу относительности;

б) если в рассматриваемой области имеется материя, то создаваемое ею гравитационное поле определяется только ее инертной массой, и, следовательно, ... только ее энергией;

в) гравитационное поле и материя вместе должны удовлетворять закону сохранения энергии (и импульса)».

Видим, что Эйнштейн связывает гравитационное поле только с энергией (или инертной массой) самой материи. Интересно сравнить эти критерии Эйнштейна с его старыми постулатами 1913 года: сейчас порядок ценностей стал обратным, а закон сохранения энергии переключался с первой позиции на третью. 6 марта 1918 года Эйнштейн отправляет в печать краткую статью «Принципиальное содержание общей теории относительности» (ССЭ, т.1, стр. 613), где он снова перечисляет основные постулаты, лежащие в основе ОТО и впервые вообще не упоминает закона сохранения энергии в качестве постулата. В этой статье Эйнштейн формулирует следующий принцип: «**G-поле ПОЛНОСТЬЮ** определено массами тел. Масса и энергия, согласно следствиям специальной теории относительности, представляют собой одно и то же; формально энергия описывается симметричным тензором энергии; это означает, что **G-поле обуславливается и определяется тензором энергии материи**».

Эйнштейн использует здесь термин «**G-поле**» как синоним гравитационного поля, но этот термин не получил распространения. Примечательно, что ученый ни слова не говорит о гравитационной энергии, и ее роли как источника гравитационного поля и снова подчеркивает, что гравитационное поле полностью определено симметричным тензором энергии обычных масс. С тех пор Эйнштейн более не считает закон сохранения основанием теории: см. также его обсуждение

постулатов общей теории относительности в 1930 (ССЭ, т.2, стр. 344) и в 1944 годах (ССЭ, т.2, стр. 568).

Новый этап эволюции мнения Эйнштейна об энергии гравитационного поля связан со статьями Эрвина Шредингера (1918) [17] (см. иллюстрацию 14) и Ганса Бауэра (1918) [18] о нефизических свойствах гравитационной энергии. Шредингер показал, что величину, введенную Эйнштейном в качестве энергии гравитационного поля, можно превратить в ноль во всем пространстве простым выбором координатной системы. Бауэр в том же томе журнала *Physikalische Zeitschrift* (уже зная о работе Шредингера) показал обратное: введя в плоском пространстве сферическую систему координат, можно получить ненулевую и даже бесконечную величину эйнштейновского выражения для гравитационной энергии.

В том же, весьма содержательном, томе журнала (стр. 165) Эйнштейн обсуждает результат Шредингера («Замечание к работе Э. Шредингера «Компоненты энергии гравитационного поля»). Эйнштейн пишет: «Шредингер был, конечно, удивлен этим результатом, который сначала показался удивительным и нам» (ССЭ, т.1, стр. 626) и, отмечает, что, ввиду нетензорности введенной Эйнштейном величины, Лоренц и Леви-Чивита «тоже не решились трактовать величины t_{σ}^{ν} как компоненты энергии гравитационного поля».

Лоренц опубликовал упомянутую Эйнштейном статью «К теории гравитации Эйнштейна» в 1916 году, работа Леви-Чивиты «Об аналитическом выражении для тензора гравитации в теории Эйнштейна» вышла в 1917. Вопрос о свойствах гравитационной энергии критически обсуждают в 1918 году также и известные ученые Г. Нордстрем («Об энергии гравитационного поля в теории Эйнштейна») и Ф. Клейн («Об интегральной форме законов сохранения и теории пространственно замкнутого мира»). Перевод на русский язык этих четырех статей можно найти в ЭС, 1980-1981.

Тем не менее, Эйнштейн категорически пишет в своей статье: «Хотя я разделяю эти соображения, убежден, что более целесообразное определение компонент энергии гравитационного поля невозможно» и отмечает, что «гравитационные поля можно задавать, не вводя напряжений и плотности энергии». Это важный пункт: Эйнштейн заявляет, что

гравитационные поля полностью описываются метрическим тензором, что фактически означает, что энергетические характеристики для гравитационного поля избыточны.

В статье «О гравитационных волнах» 1918 года (ССЭ, т.1, стр. 645) Эйнштейн пишет «Нет никаких оснований заставить понимать под t_4^4 плотность энергии гравитационного поля...», но указывает, что она полезна для вычислений потерь энергии системой, излучающей гравитационные волны.

В этом же году, в статье «Замечания к решению де Ситтера уравнений гравитационного поля» (ССЭ, т.1, стр. 647-649) Эйнштейн пишет: «...по моему мнению, общая теория относительности только в том случае представляет собой удовлетворительную схему, если на ее основе физические свойства пространства ПОЛНОСТЬЮ определяются одной лишь материей. Таким образом, никакое $g_{\mu\nu}$ -поле, то есть никакой пространственно-временной континуум, не может существовать без порождающей его материи».

В статье «Закон сохранения энергии в общей теории относительности» 1918, (ССЭ, т.1, стр. 650, поступила 30 мая 1918 года) Эйнштейн пишет: «...Почти все коллеги возражают против моей формулировки закона сохранения энергии-импульса. Однако я убежден в правильности моей формулировки и хочу в настоящей работе защитить со всей обстоятельностью свою точку зрения по этому вопросу». Подход Эйнштейна к проблеме закона сохранения энергии гравитирующих систем и описания гравитационной энергии сводится к следующим положениям:

- при определенных условиях можно сформулировать интегральный (применимый не к отдельной локальной области, а для всей системы в целом) закон сохранения энергии гравитирующих систем, который «не зависит от выбора систем координат»;
- дифференциальный закон сохранения (применимый для локальных областей пространства) содержит нетензорные величины и «...с помощью выбора систем координат... нетрудно получить самые различные распределения энергии... Так, вопреки нашему привычному мышлению, мы приходим к тому, чтобы приписывать интегралу большую реальность, чем его дифференциалам».

Фактически, гравитационная энергия объявлена Эйнштейном в принципе нелокализуемой;

- лучше описать гравитационную энергию невозможно.

В конце статьи Эйнштейн рассматривает энергию сферического мира и отмечает, что гравитационное поле «не дает вклада в полную энергию». Он показывает, что тяжелая масса системы (т.е. масса, которая порождает гравитационное поле) совпадает с инертной массой, определяемой в смысле специальной теории относительности. Если учесть, что специальная теория относительности не включает в себя гравитацию и энергию гравитационного поля, то из этой статьи Эйнштейна также можно вывести, что он в данном случае исключил гравитационное поле (и его энергию) из понятия тяжелой (гравитирующей) массы. С точки зрения современной науки, гравитационные волны несомненно обладают инерционной массой, следовательно, Эйнштейн рассматривает систему, в которой активная гравитационная масса не равна активной инертной массе.

Отметим, что на нелокализуемость гравитационной энергии еще можно закрыть глаза, когда используется интегральный закон сохранения, но фактом нелокализуемости нельзя пренебречь, если пытаться рассмотреть гравитационную энергию как источник гравитационного поля. Понятие источник всегда предполагает его четкую локализацию (одна из самых популярных фраз в теории поля: «рассмотрим *точечный* источник поля...»).

Как в частных письмах Эйнштейна отражен этот интересный период (1916-1918) осмысления уже опубликованной и растиражированной теории гравитации? Физическая проблема гравитационного воздействия гравитационной энергии возникает при переписке Эйнштейна с его другом Мишелем Бессо, который в письме от 5 декабря 1916 года (ЭС, 1974, стр. 70) обсуждает целый ряд вопросов, связанных с гравитационной энергией: «...отрицательная гравитационная энергия поля уравновешена электрической энергией поля...? ...Я твердо и упрямо провозглашал, что совершенно непростительно допускать гравитационное воздействие энергии, даже то, которое численно уравнивает тяжелую и инертную массу». Здесь речь идет об энергии

гравитационного поля, которая, по мнению Эйнштейна, нужна была для равенства гравитационной и инертной масс.

Бессо адресует прямой вопрос Эйнштейну: «Гравитационное воздействие гравитационной энергии или соответственно последняя сама по себе является у тебя только вспомогательными понятиями? Ведь она не обладает свойствами тензора; она отрицательна и поэтому для нее нет места в твоём пустом пространстве?» В единственном известном письме, написанном Эйнштейном к Бессо в декабре 1916 года, Эйнштейн, к сожалению, не отвечает на этот прямой вопрос, и сам задается вопросом: «Можно ли устроить все так, что $g_{\mu\nu}$ в действительности будут определены только самой материей, как того и требует релятивистская идея? Замечания, сделанные тобой, почти все справедливы» (ЭС, 1974, стр. 71). В этом же письме Эйнштейн обсуждает модель бесконечной Вселенной, находит ее неприемлемой и ищет выход «только в гипотезе замкнутости пространства» или «замкнутой Вселенной».

Об энергии гравитационного поля и о том, что в масштабах Вселенной она уничтожается за счет лямбда-члена уравнений поля, Эйнштейн пишет к Бессо в письме от 29 июля 1918 года. Бессо в начале августа 1918 года посылает Эйнштейну еще одно письмо с новыми вопросами о гравитационной энергии. Это письмо Бессо, к сожалению, не сохранилось, зато известно ответное письмо Эйнштейна от 20 августа 1918 года: «Твое высказывание показывает мне, что и ты придерживаешься того мнения, что можно отказаться от тензора энергии для гравитации. Но тогда закон сохранения теряет всякую ценность» (ЭС, 1974, стр. 85). Из этого видно, что Мишель Бессо не изменил своего скептического настроения к реальности гравитационной энергии. В этом же письме Эйнштейн еще раз отмечает: «Если понятие энергия-импульс не может быть распространено и на $g_{\mu\nu}$ -поле, то оно теряет всякую физическую ценность».

Обратим внимание, на замечание Бессо об отрицательности гравитационной энергии, как о некоем признаке ее нереальности. Действительно, хотя даже школьники уверенно рассуждают об отрицательной потенциальной энергии гравитационного поля, по сути, ее отрицательность есть нечто очень странное. Во всех жизненных ситуациях мы имеем дело с

источниками положительной энергии: костер, Солнце, аккумулятор, бензин, электростанция. И любого ученого можно поставить в тупик вопросом: что такое отрицательная энергия? В физике есть объекты, которым удобно формально приписать отрицательную энергию (например, ненаблюдаемым частицам из вакуума Дирака). Но все наблюдаемые объекты, с которыми мы имеем дело в реальности, имеют положительную энергию: тела, частицы, силовые поля. За одним-единственным исключением: гравитационное поле, которое обладает отрицательной энергией. Попробуем вообразить реальный объект с отрицательной энергией. Какими свойствами он может обладать? Что можно делать с этой энергией? Представьте, что вам предложили израсходовать немного отрицательной энергии. Такая задача поставит в тупик не только неискушенного человека, но и любого нобелевского лауреата. Что можно зажарить на отрицательной энергии? Такой вопрос кажется наивным? Дж. К. Максвелл опубликовал “Трактат об электричестве и магнетизме” (1873), содержащий уравнения электродинамики, которые по красоте не уступают уравнениям Эйнштейна, далеко опережая их по богатству приложений. На практическом использовании уравнений Максвелла базируется вся наша электронно-электрическая цивилизация. Этот ученый оставил глубокий след и в молекулярной теории (распределение Максвелла), и в небесной механике. Так вот, этот великий Максвелл, гениальный физик и математик-виртуоз, был в свое время так поражен фактом отрицательности энергии гравитационного поля, что резонно считал его парадоксом. Признавшись в своей неспособности представить такую отрицательную энергию гравитационного поля, он оставил всякие попытки построения теории гравитации: «Так как я не могу представить, как среда может обладать такими свойствами, я не могу двигаться дальше в этом направлении в поисках причины гравитации» (“A dynamical theory of the electromagnetic field”, 1864). Вопрос: “Что можно зажарить на отрицательной энергии?” все еще кажется наивным?

Вообразить какие-либо реальные полезные свойства объекта с отрицательной энергией просто невозможно. Главное и единственное его полезное «теоретическое» свойство заключается в том, что он позволяет держать вашу

"бухгалтерскую книгу" для энергии с графами «приход» и «расход» в привычном порядке: в физике это называется «соблюдать законы сохранения». Легко понять математические причины введения отрицательной энергии гравитационного поля, но трудно осознать физический смысл такой энергии. Вольфганг Паули отмечал в своей книге: «Именно знак плотности энергии гравитационного поля вызывал затруднения еще в старых теориях тяготения» («Теория относительности», 1983, стр. 246.)

Итак, в 1916-1918 годах Эйнштейн продолжает обдумывать вопрос о странных (и неожиданных даже для него) свойствах гравитационной энергии и обсуждает его даже в частных письмах. Отметим, что тензор энергии гравитационного поля t_{μ}^{ν} ученые часто называют «псевдотензором». С октября 1915 года по декабрь 1918 года Эйнштейн получил целый ряд писем от коллег с замечаниями относительно нековариантных (нетензорных) свойств гравитационной энергии (см. том 8 ПСЭ: письма Нордстрема от 22 сентября и 23 октября 1917 года, письмо Клейна от 20 марта 1918 года, письмо Коттлера от 30 марта 1918 года, письмо Вейля от 18 сентября 1918 года). Эйнштейн пишет Гильберту 12 апреля 1918 года: «Мой t_{μ}^{ν} отвергается всеми как некошерный» (ПСЭ, т.8, стр. 525).

Всего Эйнштейн затрагивал вопросы гравитационной энергии в 22 опубликованных письмах 1915-1918 годов (кроме упоминавшихся писем, см. в ПСЭ письма к Лоренцу от 12 октября 1915 и 19 января 1916 г.; к Эренфесту от 25 августа 1916 г.; к Дондеру от 8 и 23 июля 1916 года; к Леви-Чивита от 2 и 23 августа 1917 года; многочисленные письма 1918 года к Клейну от 13 и 24 марта, 3 и 9 июня, 22 июля, 8 ноября, 27 декабря; к Борну от 29 июня 1918 г., к Вейлю от 27 сентября 1918 года).

Эти дискуссии оказали на Эйнштейна глубокое впечатление и, в конце концов, заставили его изменить мнение о реальности гравитационной энергии и об ее гравитационном воздействии. Это изменение прослеживается в 1916-1918 годах и впервые отчетливо отражено в 1919 году, как ключевой пункт интерпретации эйнштейновских уравнений поля. В статье «Играют ли гравитационные поля существенную роль в построении элементарных частиц материи?» 1919 (ССЭ, т.1, стр.

664) Эйнштейн, записывая ставшие уже знаменитыми уравнения поля:

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = -\kappa T_{ik} \quad (1)$$

указывает, что в правой части стоит T_{ik} - тензор энергии материи. Далее Эйнштейн подчеркивает: «При этом развитие теории привело к допущению, что T_{ik} не зависят от производных g_{ik} . Ибо эти величины являются компонентами энергии в духе специальной теории относительности, в которой не рассматриваются переменные по величине g_{ik} ».

Таким образом, Эйнштейн в 1919 году прямо заявляет, что в правой части его уравнений в качестве источника поля стоит тензор энергии-импульса, полученный в рамках специальной теории относительности, в которой нет никакого искривленного пространства и метрических тензоров, ему соответствующих. Значит, в этом тензоре энергии нет гравитационного поля, или гравитационных волн и любой гравитационной энергии. Можно уверенно считать, что ОТО Эйнштейна к 1919 году приобрела окончательную физическую интерпретацию. Отметим, что для вывода математически правильных уравнений ОТО, Эйнштейну понадобилось всего два года – с 1913 по 1915, а на правильную физическую интерпретацию членов полученных уравнений ушло еще четыре года.

Но может в этой статье 1919 года Эйнштейна гравитационная энергия просто не интересовала, поэтому он пренебрег ею при записи уравнений? Опять же нет, сама эта статья посвящена возможной модели элементарных частиц. Гравитационная энергия достигает в рассматриваемой модели значительной доли (1/4) от общей энергии элементарной частицы. Таким образом, в данной работе пренебрегать энергией гравитационного поля как возможным источником дополнительного поля нельзя, и гравитационная энергия могла быть исключена из источников поля в основных уравнениях только в одном случае – если она не является, с точки зрения автора уравнений, источником гравитационного поля.

Все последующие годы Эйнштейн уже больше никогда не говорит о гравитационной энергии как об источнике гравитационного поля. В 1921 году выходит его книга «Сущность теории относительности» (ССЭ, т.2, стр. 5-81) на основе лекций, прочитанных в Принстонском университете в

США. Книга содержит ясное и детальное математическое изложение теории относительности, и позиция Эйнштейна относительно энергии весьма примечательна. Нигде во всей книге Эйнштейн ни разу не упоминает об энергии гравитационного поля как об источнике гравитационного поля – в разительном отличии от своих многочисленных высказываний 1913-1916 годов. В тоже время он детально разбирает происхождение полевых уравнений общей теории относительности, начиная от уравнения ньютоновского поля (уравнения Пуассона). О последнем он говорит: «В основе этого уравнения лежит идея, что источником гравитационного поля является плотность вещества ρ . Так же должно быть и в общей теории относительности. Но специальная теория относительности показывает, что вместо скалярной плотности вещества мы должны оперировать с тензором энергии...».

Далее Эйнштейн вводит требуемый «тензор второго ранга $T_{\mu\nu}$, структура которого нам пока известна лишь приблизительно и который включает в себя плотность энергии электромагнитного поля и вещества. В дальнейшем мы будем называть его «тензором энергии материи». ...Если в общей теории относительности существует уравнение, аналогичное уравнению Пуассона, то оно должно быть тензорным уравнением для тензора гравитационного потенциала $g_{\mu\nu}$. Правая часть его должна содержать тензор энергии материи...»

Таким образом, позиция Эйнштейна в его книге «Сущность теории относительности» (1921) сформулирована ясно: источником гравитационного поля является тензор энергии материи, состоящий из суммы тензоров энергии вещества и электромагнитного поля. Об энергии гравитационного поля он упоминает всего один раз, обсуждая закон сохранения энергии: «Необходимо помнить, что, кроме плотности энергии материи, должна быть задана и плотность энергии гравитационного поля, так что не может быть и речи о законах сохранения и импульса одной только материи. ...Гравитационное поле передает «материи» энергию и импульс, подвергая ее действию сил и сообщая ей энергию...».

В работе 1921 года «Краткий очерк развития теории относительности» (ССЭ, т.2, стр. 99) Эйнштейн пишет про теорию гравитации: «...определяющим для возникновения полей

являются весомые массы, или согласно фундаментальному результату специальной теории относительности, плотность энергии – величина, обладающая трансформационными свойствами тензора» (стр.103). Вспомним, что гравитационная энергия не описывается специальной теорией относительности и не обладает трансформационными свойствами тензора, то есть, согласно данному высказыванию Эйнштейна, таковая энергия (если кто-то хочет называть ее энергией), не может служить источником гравитационного поля. На следующей странице Эйнштейн повторяет основную идею закона гравитационного поля: «...он должен определяться тензором энергии вещества...».

С начала 20-х годов и до середины 50-х Эйнштейн в своих работах все более погружался в глубины искривленных пространств, исследуя различные тензоры, описывающие эти пространства, и надеясь построить на их основе единую теорию поля, включающую как гравитацию, так и электромагнитное поле, а также и элементарные частицы материи. Но когда он возвращался к обсуждению основ общей теории относительности, созданной много лет назад, то отчетливо повторял свою позицию относительно гравитационной энергии. Например, совершенно недвусмысленно Эйнштейн исключает энергию гравитационного поля из источников искривления пространства в 1953 году в четвертом издании книги «Сущность теории относительности». Это издание снабжено Приложением II, которое начинается так: «Содержание изложенной выше общей теории относительности формально выражается уравнением

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = T_{ik} \quad (1)$$

Левая часть этого уравнения зависит только от симметричного g_{ik} , описывающего как метрические свойства пространства, так и гравитационное поле. Правая часть уравнения (1) феноменологически описывает все источники гравитационного поля. Тензор T_{ik} представляет энергию, которая создает гравитационное поле, но сама не имеет гравитационного характера, как, например, энергия электромагнитного поля, энергия, связанная с плотностью вещества и т.д.» (ССЭ, т.2, стр. 762).

Такова позднейшая и вполне определенная точка зрения Эйнштейна и общей теории относительности на проблему -

порождает ли гравитационное поле само себя, которой Эйнштейн придерживался с 1919 до конца своей жизни или, что для него одно и то же, до окончания своих научных исследований в 1955 году. Подчеркиваем - речь идет о классической общей теории относительности. Эйнштейн потратил полжизни на поиск единой всеобъемлющей теории, включающей электромагнитное поле и теорию элементарных частиц. Как известно, ему не удалось построить такую теорию. Мы рассматриваем исключительно классическую общую теорию относительности и никак не затрагиваем работы Эйнштейна по единой теории поля.

После изучения высказываний о гравитационной энергии и об источниках гравитационного поля, приведенных в двух сотнях статей и писем Эйнштейна, ясно видна эволюция взглядов создателя ОТО на проблему энергии-импульса в общей теории относительности. В этой эволюции можно выделить следующие этапы:

1913-1914 - гравитационная энергия включается в число источников искривления пространства; закон сохранения считается основой теории гравитации; общековариантность уравнений отвергается;

1915-1916 - гравитационная энергия по-прежнему рассматривается как один из источников искривления пространства; общековариантность уравнений становится основой теории; закон сохранения переходит из категории постулата теории в следствие основных уравнений поля и по-прежнему дополняется псевдотензором гравитационной энергии;

1916-1918 - многочисленные публичные и частные дискуссии о природе гравитационной энергии; с середины 1916 года Эйнштейн ни разу больше не утверждает, что гравитационная энергия входит в число источников искривления пространства, при этом начинает связывать искривление пространства лишь с тензором энергии материи;

1919-1953 - гравитационная энергия явно исключается Эйнштейном из числа источников искривления пространства. За почти сорок лет Эйнштейн, много раз записывая свои уравнения поля общей теории относительности, ни разу более не утверждает, что гравитационная энергия входит в число источников искривления пространства (в отличие от

предыдущих своих утверждений в 1913-1916 годах) – см. Таблицу I в основном тексте книги.

Это многолетнее *неупоминание* гравитационной энергии в качестве источника гравитационного поля является наиболее красноречивым доказательством изменения точки зрения Эйнштейна на гравитационное поле гравитационной энергии. После 1916 года псевдотензор гравитационной энергии Эйнштейном практически больше не используется; законом сохранения он называет общековариантное обобщение закона сохранения энергии материи, т.е. фактически закон изменения энергии, так как обычная дивергенция тензора энергии-импульса там равна не нулю (обычная формулировка закона сохранения), а новому члену с символами Кристоффеля, которые выражаются через производные метрического тензора.

Почему же Эйнштейн, изменив свои взгляды на природу гравитационного поля, так немногословно разъяснял свою позднейшую точку зрения? Надо отметить, что гравитационная энергия как источник поля, представляла, с точки зрения первой половины XX века, сугубо теоретический интерес: практически во всех реальных случаях гравитационная энергия оказывалась на много порядков меньше энергии материи. Но самым важным обстоятельством, по-видимому, является то, что Эйнштейн считал общую теорию относительности лишь временным решением для картины мироздания и более тридцати пяти лет искал способ построения материальных частиц и электромагнитного поля из искривленного пространства. Уже 27 сентября 1918 года в письме к Вейлю он пишет: «...материя остается необъясненной» (ПСЭ, т.8, стр. 654).

Эйнштейн многократно повторял мысль о том, что в уравнения поля входит красивый тензор, характеризующий искривление пространства и некрасивый, феноменологический тензор энергии-импульса материи, конкретный вид которого зависит от рассматриваемого типа и состояния материи. В новой единой теории поля понятия энергии-импульса как материи, так и различных полей претерпели бы коренные изменения или исчезли бы вообще.

Перед Эйнштейном стояла сложная дилемма: с одной стороны, по логике общей теории относительности искривление пространства должно связываться только с тензором энергии

материи и не зависеть от производных метрического тензора, то есть от гравитационной энергии. С другой стороны, разрабатываемая им будущая единая теория поля предполагала сведение элементарных частиц самой материи (а, следовательно, и ее энергии) к некой локальной разновидности искривленного пространства (ассиметричного, с кручением или аффинного).

Таким образом, в единой теории поля искривление пространства в виде гравитационного поля могло быть связано с источниками поля в виде частиц, представляющими опять-таки искривленное пространство (может, только другого типа), что фактически противоречит логике общей теории относительности. Оказавшись в ситуации, когда будущая единая теория должна была перечеркнуть общую теорию относительности, Эйнштейн, видимо, предпочел лаконичность в обсуждении принципиальной разницы между тензором энергии материи, искривляющим пространство, и псевдотензором энергии гравитационного поля, не искривляющим пространство – ведь в его новой теории оба этих тензора должны были исчезнуть в складках изогнутого пространства-времени!

В свете такой эйнштейновской программы геометризации физических полей и избавления от тензоров энергии-импульса любых объектов совершенно нелепыми становились любые попытки приписывания гравитационному полю какого-либо тензора или псевдотензора энергии-импульса. Ведь гравитационное поле уже было идеально геометризовано и не нуждалось ни в каких дополнительных энергетических характеристиках. Отсутствие же реальной энергии у гравитационного поля сразу означает и отсутствие у него гравитационной массы, которая, по Эйнштейну, равна инертной массе или энергии.

Эйнштейн пренебрегал своей общей теорией относительностью, так был занят созданием еще более общей теории материи и пространства. Ли Смолин вспоминает о Чандрасекаре: «Чандра был зол на Эйнштейна, который после разработки общей теории относительности забросил это совершенное творение, оставив другим с трудом пробиваться сквозь эту теорию» [19].

Поэтому ученикам и последователям Эйнштейна пришлось без него разъяснять теорию относительности.

Например, в 1942 году вышла книга П. Г. Бергмана «Введение в теорию относительности» [20], представляющая собой учебник для студентов. Эйнштейн написал одобрительное предисловие к книге Бергмана, отметив, что «Эта книга... дает исчерпывающую, систематическую и логически полную трактовку главных черт теории относительности...».

Как же трактуется проблема гравитационной энергии в этой книге? В книге Бергмана есть всего лишь небольшой параграф «Законы сохранения в общей теории относительности», в котором он описывает проблемы энергии гравитационного поля. Этот раздел начинается утверждением о базисных уравнениях общей теории относительности: «тензор энергии-импульса ... представляет в уравнениях [Эйнштейна] плотности энергии и импульса и напряжения среды, исключая энергию, импульс и напряжения гравитационного поля» [20]. Подчеркнем термин «исключая». Параграф снабжен не менее примечательной сноской: «...Поскольку понятия энергии и импульса не играют существенной роли в общей теории относительности, читатель может опустить этот раздел без ущерба для понимания последующих глав».

Изменение трактовки основных физических величин в фундаментальной теории не является чем-то исключительным. Например, специальная теория относительности (СТО) была предложена А. Эйнштейном в 1905 году. Эта теория за последующие десятилетия получила солидное экспериментальное подтверждение, в том числе было доказано, что скорость времени для движущихся объектов замедляется (например, время жизни нестабильных элементарных частиц растет вместе с их скоростью). Из формул СТО следовало, что инерция тела, скорость которого стремится к световой, увеличивается до бесконечности. Это было интерпретировано как бесконечный рост инертной массы тела со скоростью. Во всех учебниках по теории относительности появилась эта переменная масса, зависящая от скорости (ее обычно называли «релятивистской массой»). Лишь во второй половине XX века появилась иная, более корректная трактовка растущей релятивистской инерции тела, например, ракеты, двигающейся с субсветовыми скоростями. Оказывается, сила, которая ускоряет ракету, зависит от отношения времени внешнего наблюдателя и

собственного времени космонавта на ракете. С точки зрения наблюдателя, двигатель ракеты работает с постоянной мощностью, но реальное ускорение ракеты вся время падает и стремится к нулю. Сила любого двигателя, пробившись сквозь барьер замедленного времени ракеты, становится столь малой, что она уже не может ускорить космонавта хотя бы до скорости света. Таким образом, релятивистская инерция тела оказалась связана не с ростом инертной массы, которую нужно считать постоянной, а с замедлением времени в быстро двигающемся теле. Об этой смене трактовки понятия массы в СТО можно прочитать в учебнике Тейлора и Уилера [21] (стр. 146), вышедшего в США в 1966 году - на шестьдесят лет позже появления СТО.

3. Эддингтон и неизвестная эйнштейновская теория 1919 года.

Теория относительности в то время (1922 г.) была уже настолько законченной системой, что до тех пор, пока не шла речь о включении атомных явлений, не было никаких оснований предполагать каких-либо существенных улучшений основ теории. Конечно, можно было развивать отдельные следствия теории, как например, теорию расширяющейся вселенной Фридмана-Леметра, но не было необходимости менять фундамент теории...

А.С. Эддингтон (1934)

Один из главных вопросов, который стоит перед современной наукой: что такое энергия? «Vis viva» или «живая сила», то есть способность тела или поля совершать работу? Или энергия – это, в первую очередь, величина, которая подчиняется закону сохранения? Есть ли “живая сила”, не связанная с энергией? Имеет ли физический смысл энергия, даже если она не может быть включена в закон сохранения? И, в конце концов, насколько абсолютно выполняется закон сохранения энергии? Эти вопросы тесно связаны с проблемой гравитационной

энергии, которая резко обострилась в общей теории относительности.

В ряду популяризаторов и интерпретаторов общей теории относительности самым большим авторитетом являлся сэр Артур Стенли Эддингтон (1882-1944), разъяснивший теорию относительности в версии 1919 года наиболее детально и выразительно.

Сэр Артур Стэнли Эддингтон, английский джентльмен, квакер и пацифист, был одним из самых блестящих ученых XX века, создавшим первую реалистичную модель звезды как газового раскаленного шара («стандартная модель Эддингтона») и открывшим зависимость «масса-светимость» для звезд. Эддингтон рассчитал образование спектра звезд («модель Милна-Эддингтона»), а также раньше всех и вопреки всем – еще в 1920 году - высказал смелую гипотезу о том, что источником звездного излучения является термоядерная реакция слияния водорода в гелий.

Впоследствии гипотеза подтвердилась, так что Эддингтон был первым человеком из миллиардов землян, смотревших на звезды, кто нашел современный физический ответ на древний лирический вопрос «Почему светят звезды?». Сам он это прекрасно понимал. Как рассказывал сам Эддингтон, вечером того дня, когда он сделал это открытие, он сидел на скамейке со своей девушкой. Она сказала: «Посмотри, как красиво светят звезды!» На что он ответил: «Да, и в данный момент я – единственный человек в мире, которые знает, *как* они светят» (цитируется по Р. Фейнману, «Какое тебе дело до того, что думают другие?» [22], стр.59).

Эддингтон ввел в науку популярное понятие «стрелы времени» и предпринял дерзкую попытку получения мировых констант в виде решений математических уравнений. Глубокую физическую интуицию Эддингтон сочетал с талантом астронома-наблюдателя и высоким профессионализмом теоретика. В научной среде первой половины XX века Эддингтон обладал огромным авторитетом. Он написал 13 научных и популярных книг, многие из которых выдержали многие издания и стали бестселлерами. Он был избран директором Кембриджской Обсерватории (1914), Секретарем Королевского Астрономического Общества (1912-1917), его Президентом

(1921-1923) и Иностранным секретарем (1936-1944). Один из кратеров Луны носит имя Эддингтона. Об Эддингтоне написано 10 книг, одна из которых «Эддингтон, наиболее выдающийся астрофизик своего времени» (1982) написана С. Чандрасекаром, имевшим серьезные основания обижаться на Эддингтона за резкую критику.

Нас будет интересовать выдающийся вклад Эддингтона в теорию относительности. Он увлекся общей теорией относительности сразу после ее создания и организовал экспедицию для проверки предсказания ОТО об отклонении света звезды в гравитационном поле Солнца. Несмотря на военное время, экспедиция под руководством Эддингтона в 1919 году получила необходимые фотографии звезд возле Солнца в момент полного солнечного затмения. Наблюдения экспедиции подтвердили общую теорию относительности Эйнштейна. Эта новость попала на страницы крупнейших газет небольшой планеты, уставшей от войны, с чего и началась заслуженная слава теории относительности и ее творца. Будучи одновременно и талантливым теоретиком, Эддингтон, бывший моложе Эйнштейна всего на три года, быстро освоил новую теорию и много сделал для ее пропаганды, выпустив 4 книги с популярным и научным ее изложением. Его знаменитая книга «Пространство, время и гравитация» (1920) [10] выдержала 15 изданий на английском языке. Главный его труд по эйнштейновской теории гравитации: «Математическая теория относительности» был написан в 1922 году [11]. В 1924 году вышло его второе английское издание (было выпущено около десятка репринтных изданий до 1975 года), в 1925 году - немецкий перевод, в 1934 – русский (см. иллюстрацию 14). Эта книга стала наиболее глубоким изложением теории относительности первой половины 20-го века, и как мы убедимся ниже, она несколько не потеряла свое значение до настоящего времени. В 1928 году Эддингтон публикует свою самую философскую книгу «Природа физического мира» (The Nature of the Physical World) [12]. В 1933 году выходит книга Эддингтона о космологии «Расширяющаяся Вселенная» (The Expanding Universe) [13].

Эддингтон был одним из самых талантливых и проницательных физиков 20 века и его мнение о теории

относительности имеет огромный вес. Стивен Хокинг в своей книге приводит такой анекдот об Эддингтоне: «Говорят, в начале двадцатых годов один журналист сказал Эддингтону, что он слышал, будто в мире всего три человека понимают общую теорию относительности. Эддингтон, помолчав, сказал: «Я думаю - кто же третий?» ([23], стр.77). Этот анекдот на самом деле близок к правде. Кип Торн пишет в своей книге «Black holes and Time Warps» [24], стр. 134: «В течение 1920-х и 30-х годов наиболее известными в мире знатоками общей теории относительности были Альберт Эйнштейн и британский астрофизик Артур Эддингтон. Другие понимали относительность, но Эйнштейн и Эддингтон задавали интеллектуальный тон в этом предмете». Физик Ганс Огянян в книге «Ошибки Эйнштейна» ([25], р. 222) пишет даже следующее: «Артур Эддингтон, который был широко известен как главный эксперт по теории относительности и который понимал ее отдельные моменты лучше, чем сам Эйнштейн...»

Соглашаясь с этими высокими оценками и стараясь не затенять блестящий стиль Эддингтона пересказом, будем максимально полагаться на обширные цитаты из его «Математической теории относительности» - далее МТО.

Уже во «Введении» сэр Эддингтон пишет следующее: «Развитие физики идет вперед, и по мере того как теории внешнего мира выкристаллизовываются, мы часто стремимся элементарные физические величины, определенные операциями измерения, заменить теоретическими величинами, которые, как нам кажется, имеют более фундаментальное значение во внешнем мире. Так, например, *vis viva* (живая сила) $mv^2/2$, которую мы можем непосредственно определить на опыте, заменяется обобщенной энергией, неявно определяемой по свойству сохранения своей величины. Наша задача, таким образом, становится обратной. Мы должны теперь не открывать свойства величины, которую мы обнаружили в природе, но установить, как мы можем обнаружить величину, свойства которой мы заранее постулировали. Такое развитие науки представляется неизбежным, но оно имеет большие недостатки, в особенности в тех случаях, когда нам надо перестраивать теорию. Более полное изучение может показать нам, что в природе нет ничего такого, что в точности обладало бы

заданными свойствами; или может оказаться, что величина, обладающая данными свойствами, полностью потеряла свое значение в связи с новыми теоретическими воззрениями».

Далее Эддингтон добавляет в присущих ему ярких выражениях: «В п. 59 мы увидим, что как раз последнее произошло с энергией. Мертвая рука устарелой теории продолжает давить нас, так как в этом случае принятая обычно терминология все еще неявно связана с ней. Но, конечно, это является лишь мелким недостатком по сравнению со множеством преимуществ, получаемых от классического обобщения энергии, как определенной ступени к более полной теории». (МТО, стр. 18-19). В упомянутом параграфе 59, Эддингтон пишет (стр. 248-249): «Законы сохранения материальной энергии и количества движения формально выражаются уравнениями:

$$\frac{\partial T_{\mu}^{\nu}}{\partial x_{\nu}} = 0 \quad (59.1)$$

...Мы обобщили это уравнение в соответствующее тензорное уравнение: $T_{\mu;\nu}^{\nu} = 0$, которое уже не является математическим выражением сохранения чего-либо».

Чтобы лучше понять это утверждение Эддингтона распишем приведенное им тензорное уравнение в явном виде (см., например, Ландау и Лифшиц, «Теория поля»):

$$T_{\mu;\nu}^{\nu} \equiv \frac{\partial T_{\mu}^{\nu}}{\partial x_{\nu}} + \Gamma_{\lambda\nu}^{\nu} T_{\mu}^{\lambda} - \Gamma_{\nu\mu}^{\lambda} T_{\lambda}^{\nu} = 0 \quad (2)$$

Уравнение (59.1) описывает классический закон сохранения, когда при условии нулевого потока через границу системы (дивергенция (59.1) равна нулю), ее энергия сохраняется постоянной. Уравнение (2) включает, кроме классической дивергенции, еще и члены с символами Кристоффеля, зависящими от метрического тензора и его производных. Тем самым, уравнение (2) описывает систему, в которой энергия может меняться даже в условиях замкнутости системы, благодаря изменению гравитационных полей в системе. Выражение (2) часто называют законом сохранения, но, как отмечают Ландау и Лифшиц (т.2), соглашаясь с Эддингтоном, «это уравнение, вообще говоря, не выражает закона сохранения чего бы то ни было».

Отказавшись от закона сохранения энергии в пользу более общего закона, Эддингтон считает вопрос об энергии исчерпанным с точки зрения релятивистской теории. Далее он лишь сопоставляет это новое релятивистское решение со старым подходом:

«Интересно сравнить этот путь с традиционным методом, в котором уравнение (59.1) обобщается таким образом, что форма закона сохранения явно остается.

В классической механике закон сохранения спасают введением нового вида энергии - потенциальной энергии, не содержащейся в T_μ^v . При этом предполагается, что потенциальная энергия запасена в поле тяготения; количество движения и компоненты напряжения тоже могут иметь какие-то невидимые дополнения в поле тяготения. Поэтому к T_μ^v нужно добавить добавочное выражение t_μ^v , объединяющее потенциальную энергию, количество движения и напряжение. Тогда закон сохранения должен иметь место только для всей суммы. Если положить

$$S_\mu^v = T_\mu^v + t_\mu^v \quad (59.2)$$

то искомое обобщение (59.1) будет гласить:

$$\frac{\partial S_\mu^v}{\partial x_\nu} = 0 \quad (59.3)$$

Разница между релятивистским и классическим пониманием заключается таким образом в следующем. В обеих теориях устанавливается, что хотя T_μ^v и сохраняется в некоторых случаях, но в общем случае это сохранение не имеет места. В теории относительности ищется более общий закон, которому подчиняется T_μ^v , справедливый также и в том случае, когда T_μ^v не сохраняется точно; этим законом оказывается соотношение $T_{\mu;\nu}^v = 0$. Классическая же теория вводит новый вид энергии таким образом, чтобы закон сохранения оставался верным, но для другой величины, а именно в форме $\frac{\partial S_\mu^v}{\partial x_\nu} = 0$. Следовательно, релятивистская теория придерживается физической величины и видоизменяет закон. Классическая же теория придерживается закона и видоизменяет физическую величину».

Под классической теорией Эддингтон понимает не только ньютоновскую механику, но и теорию относительности 1915 года, которая также использует псевдотензор гравитационной

энергии для спасения закона сохранения. А релятивистской он зовет теорию, которую мы называем теорией Эйнштейна 1919 года, где псевдотензор уже не играет существенной роли. Эта страница из книги Эддингтона является шедевром научной логики и смелости, а вся книга беспримерна по уровню проникновения в суть теории относительности. Ведь общая теория относительности - это не только набор математических уравнений, которые сейчас хорошо известны, но и это еще и совершенно новое мировоззрение, овладеть которым удалось далеко не многим. Весной 2003 года я беседовал с одним видным гравитационистом мировой величины, который, считая себя эйнштейнианцем, доказывал, что искривленное пространство - это все ерунда, что теорию Эйнштейна можно интерпретировать в терминах плоского пространства, где работается гораздо приятнее и нечего тут выдумывать всякие сложности на свою голову... Ли Смолин обсуждает эту тему в своей статье: «Сколько профессиональных физиков являются эйнштейнианцами? ...Общая теория относительности - это наиболее радикальное и трудное из эйнштейновских открытий – настолько, что я полагаю, что большинство физиков, даже физиков-теоретиков, не осознали его полностью. ...Является ли хоть кто-нибудь из нас его последователем?» [19].

Эддингтон, в отличие от подавляющего большинства других авторов, в своей книге ссылается на важную статью Эйнштейна 1919 года, где Эйнштейн впервые прямо подчеркнул исключение гравитационной энергии из числа источников гравитационного поля.

Как и Эйнштейн в книге «Сущность теории относительности» (1921), Эддингтон часто называет новый закон для энергии «законом сохранения энергии и количества движения, потому что, хотя это уравнение и не имеет вида закона сохранения, оно все же выражает в точности те свойства, которые классическая механика приписывает закону сохранения» (стр. 250). Аналогично поступает и К. Ленг в своем известном справочнике «Астрофизические формулы» ([26], стр. 305) и многие другие физики.

В. И. Родичев так описывает дилемму, стоящую перед учеными-гравитационистами: либо энергия гравитационного поля – не тензор, тогда закон сохранения будет

общековариантен, либо энергия гравитационного поля – тензор, но тогда закон сохранения энергии нарушается. Родичев считает, что «тот и другой случай неприемлем с физической точки зрения».

Отметим, что для физиков наиболее важно существование уравнения, описывающего динамику энергии, а не сам факт сохранения энергии. Например, существует система уравнений гидродинамики для частиц колец Сатурна [27] и одним из этих уравнений является уравнение энергии. Это уравнение в случае упругих частиц выражает сохранение энергии частиц, а в реалистическом случае неупругих тел описывает несохранение механической энергии, которая расходуется на нагрев материала частиц. В уравнении в этом случае добавлялся новый член, описывающий несохранение механической энергии, но с точки зрения полноты описания динамической системы важен был лишь факт наличия такого уравнения энергии, безотносительно к сохранению энергии. Интересно, что богатство динамики и степень самоорганизации системы, где энергия не сохранялась в указанном смысле, были намного выше, чем в более идеализированной системе, где механическая энергия частиц сохранялась.

Эддингтон не рассматривает нетензорность энергии гравитационного поля как некий временный недостаток, который можно исправить. Он считает «очевидным», что эта энергия не может быть тензором, «так как при употреблении естественных координат величина t_{μ}^{ν} равна нулю в соответствующей точке, и поэтому должна была бы всегда равняться нулю, если бы она была тензорной плотностью» (стр. 250).

Ученый уверен в том, что классический закон сохранения энергии несовместим с общей теорией относительности и пишет: «Эта разница между классическим и релятивистским взглядом на энергию позволяет вспомнить замечание, сделанное нами во введении, об определении физических величин. После того как был найден принцип сохранения энергии, физики превратили его практически в определение энергии, так что энергия рассматривалась как *нечто*, подчиняющееся закону сохранения. При этом физик следовал приемам чистого математика, когда он, вместо того чтобы описать измерение энергии, определял ее посредством тех свойств, которыми он наделял ее по своему

желанию. Подобный способ в свете новейших исследований оказался очень неудачным. Верно, конечно, что можно найти величину S_{μ}^{ν} , удовлетворяющую такому определению, но только она не представляет собой тензора и поэтому не может явиться непосредственной мерой какого-либо инвариантного мирового соотношения. Вместо того чтобы обременять себя подобной величиной, не представляющей сейчас существенного интереса, мы возвращаемся к первоначальной идее *vis viva* («живой силы») - правда обобщенной, поскольку в нее включена теплота или «живая сила» молекул, но зато не потенциальная энергия. При этом мы находим, что эта «живая сила» сохраняется формально не во всех случаях, но что она подчиняется закону, согласно которому ее расходимость равна нулю; это обстоятельство является с нашей новой точки зрения более простым и значительным, чем простое сохранение» (стр. 251-252).

Подчеркнем смелое утверждение Эддингтона о том, что лучше иметь тензорный закон несохранения энергии, чем нетензорный закон ее сохранения. С учетом важности энтропии для самоорганизации физических систем (см. раздел 13.1 основного текста), можно уточнить, что под «живой силой» системы лучше понимать энергию в сочетании с низкой энтропией.

Что думает Эддингтон о гравитационном поле как источнике дополнительного поля? В 1920 году Эддингтон пишет: «Можно поставить вопрос о том, имеет ли массу электрическая энергия, не связанная с электрическими зарядами; в случае света ответ на этот вопрос утвердителен. Свет обладает массой. Вероятно, и гравитационная энергия имеет массу; или, если это не так, масса возникает, когда гравитационная энергия, как это часто случается, обращается в кинетическую энергию. Масса всей (отрицательной) гравитационной энергии земли есть величина порядка *минус* миллиард тонн» ([10], стр. 62-63).

Таким образом, в 1920 году Эддингтон, крупнейший знаток теории относительности, обсуждает возможность того, что гравитационная энергия не имеет массы, и не видит здесь никаких противоречий с теорией Эйнштейна. Несколькими годами позже, в книге 1922 года Эддингтон нигде не использует версию уравнения поля 1915-1916 года и заключает главу о релятивистской механике следующими словами: «Обычная

потенциальная энергия поднятого вверх груза не считается в нашей теории энергией и поэтому не входит в выражение тензора энергии. Она оказывается излишней, так как свойства нашего тензора энергии было сформулировано в виде общего закона, более простого с абсолютной точки зрения, чем формальный закон сохранения. Потенциальная энергия и количество движения t_{μ}^{ν} , которые нам нужны, если мы хотим удержать формальный вид сохранения, не образуют тензора; их нужно рассматривать как математическую фикцию, а не как представление каких-либо имеющих физический смысл мировых соотношений. Псевдо-тензор энергии t_{μ}^{ν} можно по произволу создавать и уничтожать, выбирая соответствующим образом систему координат, и он не обращается обязательно в нуль в мире, не содержащем тяготеющей материи (в плоском мире). Поэтому невозможно считать его чем-то аналогичным действительному тензору энергии» (с.279).

Мнение Эддингтона о гравитационном воздействии энергии гравитационного поля очевидно: математическая фикция не может служить источником реального физического поля. Как видно из эпиграфа к данному разделу, в момент написания этой книги Эддингтон считал теорию относительности законченной теорией, не нуждающейся в каком-либо изменении основ. Таким образом, Эддингтон в данной книге высказывает не собственные оригинальные соображения, а лишь, по его мнению, более ясно и подробно излагает теорию относительности Эйнштейна в версии 1919 года. При этом взгляды ньютоновской механики и теории относительности 1913-1916 года на энергию гравитационного поля он относит к традиционным и устарелым.

В книге «Загадка Эддингтона» [28] Д. Эванс, биограф Эддингтона, также отмечает, что в теории относительности «его роль была скорее популяризатора, чем творца». То есть, книга Эддингтона описывает не его собственные теории, а самую последнюю и правильную версию теории Эйнштейна, которую автор ОТО изложил в своих работах после 1918 года. Эддингтон ярче и четче, чем сам Эйнштейн, раскрыл в своей книге суть общей теории относительности. Во-первых, он был более опытным популяризатором, во-вторых, над ним не довлела эйнштейновская идея временности общей теории относительности, которую вот-вот заменит единая теория поля.

Судя по всему, Эддингтон верил в эйнштейновскую общую теорию относительности больше самого Эйнштейна.

Отметим, что Эйнштейн считал Эддингтона лучшим интерпретатором теории относительности. О его книге «Математическая теория относительности» Эйнштейн писал так: «Наилучшее изложение предмета на любом языке». В 1925 году Эйнштейн пишет, по просьбе Эддингтона и Куранта, работу «Теория Эддингтона и принцип Гамильтона» как приложение к немецкому переводу 2-го английского издания книги Эддингтона «Математическая теория относительности». То есть, к цитируемой выше книге, где Эддингтон категорически отказался признавать реальность энергии гравитационного поля и однозначно высказался в пользу закона изменения энергии, сменившем в искривленном пространстве закон сохранения. Но Эйнштейн обсуждает в приложении идеи Эддингтона по построению модели электрона (и высказывает сомнения в них) и никак не возражает выраженным в книге взглядам Эддингтона на энергию гравитационного поля, что можно расценить как его согласие с Эддингтоном.

Эйнштейн обращал особое внимание на то, как излагается в книгах по теории относительности вопрос о энергии гравитационного поля и законе сохранения энергии. Например, в рецензии 1918 года на книгу Вейля «Пространство, время, материя» [29] он пишет: «...следует упомянуть, что я не совсем согласен с точкой зрения автора по поводу смысла закона сохранения энергии» (ССЭ, т.4, стр. 43). В последующих изданиях Вейль, по-видимому, учел это замечание. В краткой рецензии 1922 года на книгу Паули «Теория относительности» [30] Эйнштейн пишет: «Особенно ценным является изложение закона сохранения энергии». (ССЭ, т.4, стр. 46).

Эйнштейн высказался одобрительно и о книге Эддингтона «Пространство, время и тяготение», опубликованной в 1920 году, и где Эддингтон допускает, что гравитационное поле не обладает гравитационной массой (см. выше). 4 августа 1920 года Эйнштейн пишет Лоренцу, который обсуждал эту книгу Эддингтона: «Мне очень любопытны ваши комментарии к книге Эддингтона. Я имею возражения только к его позиции о граничных условиях (космолог[ическая] проблема)...» (ПСЭ, т.10, стр. 228).

Эрвин Шредингера относится к числу наиболее проницательных и разносторонне одаренных физиков. Он всемирно известен как один из создателей квантовой механики, получивший за это Нобелевскую премию. Он глубоко понимал эйнштейновскую теорию гравитации и написал не только знаменитую статью 1918 года о нетензорности гравитационной энергии [17] (см. иллюстрацию 14), но и две книги по гравитации и космологии [31,32].

Шредингер, вслед за Эйнштейном и Эддингтоном, не считает потенциальную энергию гравитационного поля реальной: «знаменитый и особенно поразительный пример: полное количество T_4^4 (т.е. энергии и массы), заключенной в замкнутой расширяющейся Вселенной, *уменьшается*. ... С дорелятивистской точки зрения ...энергия не теряется, а запасается в виде потенциальной энергии тяготеющих масс, удаляющихся друг от друга. Другой пример заключается в том, что энергия – и угловой момент – «уносится» из системы через пустое пространство ... с помощью гравитационных волн, излучаемых системой... Излученная энергия не обязана где бы то ни было проявляться в качестве T_4^4 ; но это может произойти и произойдет, когда эти волны натолкнутся на другую систему, способную частично поглотить их. Весь процесс имеет большое сходство с тем, что хорошо известно нам из классической теории испускания и поглощения электромагнитного излучения, за исключением того, что *истинный* тензор энергии T_k^i равен нулю внутри волн на всем протяжении их пути сквозь пустое пространство» («Пространственно-временная структура Вселенной»).

Эту же точку зрения он высказывает в книге «Расширяющиеся Вселенные», 1956: «...вся вселенная теряет энергию, как если бы ее содержимое своим давлением работало на увеличение ее объема. ...куда девается энергия? В ньютоновой механике мы сказали бы, что она затрачивается на преодоление взаимного гравитационного притяжения и хранится в виде гравитационной потенциальной энергии. Из теории Эйнштейна понятия гравитационной силы тяги и потенциальной энергии исчезли, хотя они изредка используются в целях краткости речи. ...Закон сохранения не дает возможности утверждать, что объем энергии, заключенный в любой данной пространственной

области, постоянен, при условии, что нет никакого движения энергии через ее границу... Хорошо известным трюком является приведение законов сохранения к обычной дивергенции... это достигается за счет введения необщеквариантного (псевдо-) тензора энергии-импульса-натяжений... Величиной, не зависящей от времени, в нашем случае является интеграл по всему пространству от суммы плотности энергии материи и плотности гравитационной псевдоэнергии. И, конечно, последняя вносит тот вклад, который в ньютоновой механике был бы назван гравитационной потенциальной энергией. Таково решение кажущегося парадокса, нравится оно нам или нет».

Как и Эддингтон, Шредингер относит гравитационную потенциальную энергию к дорелятивистским понятиям и считает, что в эйнштейновской теории такой энергии нет.

Дирак в своих лекциях по общей теории относительности следует лаконичной манере Эйнштейна и отмечает, что правую часть уравнений ОТО «...следует интерпретировать как плотность и поток энергии и импульса (негравитационного происхождения)» и что «в искривленном пространстве энергия и импульс сохраняются лишь приближенно...» [33].

Распространено следующее «доказательство» того, что псевдотензор энергии-импульса гравитационной энергии является источником гравитационного поля. В книге С. Вайнберга [34] (стр. 182) и ряде других монографий проводится следующая математическая операция над уравнением Эйнштейна для изолированной физической системы со слабым гравитационным полем, окруженной плоским пространством на бесконечности: левая часть уравнения Эйнштейна раскладывается на ряд линейных (по метрическому тензору) членов и на набор нелинейных членов, которые потом переносятся в правую часть уравнений. Совокупность нелинейных членов, перенесенных в правую часть уравнения Эйнштейна, объявляется псевдотензором энергии-импульса гравитационного поля и дополнительным источником гравитационного поля, то есть, тех линейных членов, которые остались в левой части уравнения Эйнштейна. Этот расчет расценивается как математически строгое доказательство факта, что энергия гравитационного поля сама является источником гравитационного поля. Такого же мнения придерживался,

например, и известный физик-гравитационист Леонид Гришук (высказано в частной беседе с автором в 2003 году).

Полагаем, что данный формальный трюк не является доказательством чего-либо. Теория, полученная в результате такого преобразования, строго говоря, уже не является эйнштейновской теорией относительности. Отметим, что псевдотензор гравитационной энергии, полученный в результате такого трюка, по-прежнему не является настоящим тензором: он неоднозначен и зависит от выбора системы координат, то есть содержит весь букет проблем, типичных для описания гравитационной энергии. Мизнер, Торн и Уилер [14] детально исследовали подобную линеаризацию уравнений Эйнштейна и показали, что она меняет принципиальное физическое содержание теории. Это еще один пример того, насколько физическая интерпретация математики сложнее самих математических преобразований. Получившаяся в итоге линеаризованная теория гравитации соответствует плоскому пространству (эту теорию Мизнер, Торн и Уилер называют также «тензорной теорией гравитационного поля в плоском пространстве-времени» или теорией поля со спином 2). Сравнение и противопоставление эйнштейновской теории гравитации и линеаризованной теории со спином 2 проведено в Дополнении 18.1 книги Мизнера, Торна и Уилера [14]. Примечательно, что с математической точки зрения уравнения Эйнштейна в обеих теориях совпадают, но основное физическое содержание теорий различно как по геометрии пространства-времени, так и по тому, является ли тензор энергии-импульса гравитационного поля самостоятельным источником поля.

Если обратиться к современным учебникам и монографиям по теории гравитации, то легко заметить, что часть из них придерживается устаревшей трактовки ОТО 1915 года, а часть – более современной интерпретации 1919 года. Вот что написано в знаменитом учебнике по гравитации Ч. Мизнера, К. Торна и Дж. Уилера, Гравитация, 1977 (т.2): «Имеет смысл спрашивать о количестве электромагнитной энергии-импульса в элементе 3-объема. Во-первых, для этой величины имеется одна и только одна формула. Во-вторых, что более важно, эта энергия-импульс «имеет вес». Она искривляет пространство. Она служит источником, стоящим в правой части уравнений поля

Эйнштейна. ...Она наблюдаема. «Локальная гравитационная энергия-импульс» не обладает ни одним из этих свойств. Для нее нет единственной формулы, а имеется множество различных формул. ...Более того, «локальная гравитационная энергия-импульс» не весит, не искривляет пространство, не служит источником, стоящим в правой части уравнений поля Эйнштейна, ... и не наблюдаема. Всякий, кто ищет магическую формулу для «локальной гравитационной энергии-импульса», ищет правильный ответ на неправильно поставленный вопрос. К несчастью, в прошлом было потрачено много времени и усилий, чтобы «ответить на этот вопрос», пока исследователи не осознали тщетность подобных попыток...»

П.К. Рашевский в своем классическом учебнике [35] придерживается трактовки Эйнштейна-Эддингтона-Шредингера, и подчеркивает, что тензор энергии-импульса, стоящий в правой части уравнений Эйнштейна, «учитывает суммарное распределение и движение всех видов энергии и импульса *за исключением энергии и импульса гравитационного происхождения*. Мы выделяем, таким образом, явления тяготения в особый разряд; это связано с тем, что физическое содержание общей теории относительности как раз и сводится к объяснению этих явлений».

Но значительное количество физиков под эйнштейновской теорией относительности по-прежнему понимают устаревшую теорию 1915 года. Неприятие и неиспользование окончательного (1919 года) варианта общей теории относительности, часто связанное с недостаточным пониманием тонкостей ОТО, привело к столетней борьбе с так называемой «проблемой гравитационной энергии», а заодно вызвало серьезнейший кризис в космологии.

Основная использованная литература

1. Эйнштейн, А. Собрание сочинений, Т.1, М., Наука, 1965.
2. Эйнштейн, А. Собрание сочинений, Т.2, М., Наука, 1966.
3. Эйнштейн, А. Собрание сочинений, Т.3, М., Наука, 1966.
4. Эйнштейн, А. Собрание сочинений, Т.4, М., Наука, 1967.
5. Einstein, A. The Collected Papers, v.7. The Berlin Years: Writings, 1918-1921. Princeton University Press, 2002.

6. Einstein, A. The Collected Papers, v.8. The Berlin Years: Correspondence, 1914-1918. Princeton University Press, 1998.
7. Einstein, A. The Collected Papers, v.9. The Berlin Years: Correspondence, January 1919-April 1920. Princeton University Press, 2004.
8. Einstein, A. The Collected Papers, v.10. The Berlin Years: Correspondence, May-December 1920, and supplementary correspondence, 1909-1920. Princeton University Press, 2006.
9. Серия «Эйнштейновских сборников», М, Наука, (14 выпусков, 1966-1985 гг).
10. Эддингтон, А.С. (1920) Пространство, время и тяготение, М.УРСС, 2003.
11. Эддингтон, А.С. (1922) Теория относительности, Л.-М. ОНТИ-ГТТИ. 1934.
12. Eddington, A.S. (1928) The Nature of the Physical World. Cambridge Univ.Press, 1944.
13. Eddington, A.S. (1933) The Expanding Universe. Cambridge Univ.Press, 1988.
14. Мизнер, Ч., Торн, К., и Уилер, Дж. (1977) Гравитация. М, Мир, т.1, 2, 3.
15. Родичев, В.И. Теория тяготения в ортогональном репере, М. Наука, 1974.
16. Kottler, Friedrich (1916), Über Einsteins Äquivalenzhypothese und die Gravitation. Separat-Abdruck aus den Annalen der Physik, Band 50, 955-972. Johann Ambrosius Barth. Leipzig.
17. Schrödinger, Erwin. (1918) Die Energiekomponenten des Gravitationsfeldes, Physikalische Zeitschrift, XIX, s. 4-7. (Перевод – ЭС, 1980-1981, с. 204-210).
18. Bauer, Hans. (1918) Über die Energiekomponenten des Gravitationsfeldes, Physikalische Zeitschrift, XIX, s.163-165. (Перевод – ЭС, 1980-1981, с. 211-216).
19. Smolin, Lee. “Einstein’s lonely path”, Discover, Sept. 2004. p.36-41.
20. Бергман, П.Г. Введение в теорию относительности. М. ИЛ., 1947.
21. Тейлор, Э.Ф., Уилер, Дж.А. Физика пространства-времени. М. Мир, 1971.

22. Фейнман, Р.Ф. Какое тебе дело до того, что думают другие? Ижевск, НИЦ РХД, 2001.
23. Хокинг, С. От большого взрыва до черных дыр. Краткая история времени. Мир, 1990.
24. Thorne, K.S., Black holes & time warps. Einstein's outrageous legacy. W.W. Norton & Company, 1994, p.524
25. Ohanian, Hans, Einstein's Mistakes. The human falling of genius. W.W.Norton & Co. NY, London, 2008.
26. Ленг, К. Астрофизические формулы, М, Мир, 1978.
27. Горькавый, Н.Н. и Фридман, А.М. Физика планетных колец. Небесная механика сплошной среды», Москва, Наука, 1994.
28. Evans, D.S. The Eddington Enigma. Xlibris Corp, 1998.
29. Weyl, H. (1918) Space-Time-Matter, Dover Publications, 1952.
30. Паули, В. (1921) Теория относительности, М. Наука, 1983.
31. Шредингер, Э. (1950) Структура пространства-времени. (Пространственно-временная структура Вселенной. (1986), М. Наука, ГИФМЛ.)
32. Шредингер, Э. (1956) Расширяющиеся Вселенные. (там же).
33. Дирак, П.А.М. Общая теория относительности, 1978.
34. Вайнберг, С. Гравитация и космология. М. Мир, 1975.
35. Рашевский, П.К. Риманова геометрия и тензорный анализ. М.: Наука, 3-е изд., 1967.

Приложение II. Модель циклической Вселенной в общей теории относительности

Общая теория относительности (ОТО) Альберта Эйнштейна является фундаментом для построения космологических моделей. Данное приложение содержит основные математические решения, полученные для модели замкнутой циклической Вселенной, содержащей обширную популяцию из черных дыр.

1. Механизм Большого взрыва и проблема сингулярности

Из-за многочисленных слияний черных дыр при сжатии Вселенной значительная часть их массы должна перейти в гравитационные волны. Согласно Эйнштейну (1919, 1953), Эддингтону (1934), Шредингеру (1986), Anderson (2018) и другим авторам, гравитационная масса Вселенной будет уменьшаться при генерации гравитационного излучения. Kutschera (2003) получил в приближении слабого поля модифицированную метрику Шварцшильда для переменной гравитационной массы расширяющегося фэйрбола:

$$ds^2 = [1 - b(t, r)]c^2 dt^2 - [1 + b(t, r)](dx^2 + dy^2 + dz^2) \quad (1)$$

где

$$b(t, r) = \frac{2GM(t - \frac{r}{c})}{rc^2} \quad (2)$$

а $M(t - \frac{r}{c})$ является переменной гравитационной массой, поле которой описывается запаздывающим потенциалом с $t - \frac{r}{c}$. Kutschera (2003) сделал вывод, что уменьшение гравитационной массы фэйрбола порождает монополярную гравитационную волну. Gorkavyi & Vasilkov (2016) рассмотрели квазисферическую систему с переменной массой, состоящую из многих излучателей гравитационных волн, и независимо получили аналогичную метрику пространства-времени. Отметим, что теорема Биркгофа, на которую нередко ссылаются в качестве аргумента против существования монополярной гравитационной волны, не применима к системам с гравитационным излучением, не обладающим строгой

сферической симметрией (Синг, 1960). Получим нулевую компоненту метрического тензора из метрики (1), следуя вычислениям Gorkavii & Vasilkov (2016). Запишем уравнения Эйнштейна в следующем виде (см., например, монографию Вайнберга, 1975):

$$R_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} (T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}T^\lambda{}_\lambda) \quad (3)$$

где слева стоит тензор Риччи, составленный из вторых производных метрического тензора $g_{\mu\nu}$, а справа – комбинация из $g_{\mu\nu}$ и тензора энергии-импульса материи $T_{\mu\nu}$, в который не включается энергия гравитационного поля или излучения (Эйнштейн, 1919, 1953).

Рассмотрим квазисферическую систему, которая содержит большое количество сливающихся черных дыр, генерирующих гравитационное излучение. Для слабого внешнего гравитационного поля этой системы: $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$, где $\eta_{\mu\nu}$ – тензор Минковского для плоского пространства-времени, и $h_{\mu\nu} \ll \eta_{\mu\nu}$. Запишем уравнение Эйнштейна для слабого поля в хорошо известном виде (Ландау и Лившиц, 1973; Вайнберг, 1975):

$$\left(\nabla^2 - \frac{\partial^2}{c^2\partial t^2}\right) h_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} S_{\mu\nu} \quad (4)$$

где

$$S_{\mu\nu} = T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu}T^\lambda{}_\lambda \quad (5)$$

Решением волнового уравнения (4) является запаздывающий потенциал (Вайнберг, 1975; Мизнер, Торн, Уилер, 1977; Ландау и Лифшиц, 1973), в который входит переменная гравитационная масса, проинтегрированная по объему V_* :

$$h_{\mu\nu}(t, r) = \frac{4G}{c^4} \int \frac{S_{\mu\nu}(r_*, t - \frac{r-r_*}{c})}{r-r_*} dV_* \quad (6)$$

Пренебрегая скоростями движения тел по сравнению со скоростью света, нулевую компоненту тензора S_{00} запишем в простом виде:

$$S_{00} = \frac{1}{2}T_{00} \approx \frac{1}{2}\rho c^2 \quad (7)$$

Для массы системы, занимающей компактный объем с радиусом $r_* \ll r$, запишем:

$$M\left(t - \frac{r}{c}\right) \approx \int \rho\left(t - \frac{r-r_*}{c}\right) dV_* \quad (8)$$

Из (6)-(8) получим для нулевой компоненты h_{00} :

$$h_{00}(t, r) = \frac{2GM\left(t - \frac{r}{c}\right)}{rc^2} \quad (9)$$

Это даст искомую нулевую компоненту метрического тензора из метрики (1)-(2):

$$g_{00}(t, r) = -\left[1 - \frac{2GM\left(t - \frac{r}{c}\right)}{rc^2}\right] \quad (10)$$

Хотя выражение (10) похоже на нулевую компоненту тензора из метрики Шварцшильда, оно описывает более сложный случай переменной гравитационной массы и зависит от запаздывающего потенциала. Можно рассматривать выражения (1),(2),(10) как модифицированную метрику Шварцшильда. Мы также будем называть ее метрикой Кутчеры.

Gorkavii & Vasilkov (2016) вычислили и исследовали гравитационное ускорение для метрики Кутчеры (1)-(2). Запишем, с учетом (10), выражение для гравитационного ускорения $F(t, r)$ в случае слабых полей и медленных движений (Вайнберг, 1975):

$$F(t, r) \approx \frac{c^2}{2} \frac{\partial g_{00}}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \frac{GM\left(t - \frac{r}{c}\right)}{r} \quad (11)$$

или, после дифференцирования:

$$F(t, r) \approx -\frac{GM\left(t - \frac{r}{c}\right)}{r^2} + \frac{G}{r} \frac{\partial M\left(t - \frac{r}{c}\right)}{\partial r} \quad (12)$$

В (12) первый член справа характеризует всегда отрицательную ньютоновскую силу, описывающую только притяжение, которое в рассматриваемом случае может меняться по величине со временем из-за вариаций массы. Если рассмотреть, например, Солнечную систему, где орбита планеты определяется, на ньютоновском языке, равновесием гравитационной и центробежной сил, то уменьшение ньютоновского члена из-за уменьшения гравитационной массы должно вызывать смещение планеты наружу из-за избытка центробежной силы. Этот эффект иногда ошибочно рассматривается как «антигравитация», хотя никакой отталкивающей гравитационной силы здесь нет. Отметим, что уравнение (12) не включает центробежных ускорений, поэтому не может описывать нарушение баланса между гравитационной и центробежной силами. При этом второй член в правой части (12)

принципиально отличен от члена ньютоновского притяжения: он зависит от скорости изменения массы и может менять свой знак.

Опишем переменную массу M функцией, которая, в зависимости от знака показателя α , может описывать как уменьшение, так и увеличение массы:

$$M = M_0 e^{-\alpha(t-\frac{r}{c})} \quad (13)$$

Для функции (13) выведем из (12) следующее выражение для гравитационного ускорения (простым способом оно было получено в заметке Gorkavii, 2003):

$$F \approx -\frac{GM}{r^2} + \frac{\alpha GM}{c r} \quad (14)$$

При $\alpha > 0$ (уменьшение массы) новый член гравитационного ускорения описывает «антигравитацию», а при $\alpha < 0$ (увеличение массы) - «гипергравитацию». Отметим, что новый член (14), в отличие от обычного ньютоновского члена гравитации, имеет релятивистский характер и в классическом пределе (при устремлении скорости света c к бесконечности) исчезает. Так как новый член слабее зависит от расстояния - как r^{-1} , а не r^{-2} , как у ньютоновского притяжения, то новая сила должна доминировать на космологических масштабах. Подчеркнем, что никаких центробежных сил уравнение (14) не включает, поэтому бессмысленны попытки интерпретировать обсуждаемую антигравитацию как проявление центробежных эффектов. Также неверно рассматривать уменьшение ньютоновского притяжения как «антигравитацию», потому что эффект уменьшения ньютоновской силы описывается в (14) классическим отрицательным членом с r^{-2} , то есть он, при любых изменениях гравитирующей массы, описывает только притяжение.

Проясним физический смысл уравнения (14), записав гравитационное ускорение через квазиньютоновский потенциал φ (Gorkavii, 2003):

$$F(t, r) = -\frac{\partial \varphi}{\partial r}, \quad \text{где } \varphi = -\frac{GM(t-\frac{r}{c})}{r} \quad (15)$$

После дифференцирования потенциала φ получим выражение (14). Как нетрудно показать из анализа нового потенциала (15), антигравитация возникает тогда, когда склон потенциала направлен не внутрь, как в случае ньютоновского притяжения, а

наружу: потенциал образует не воронку, а пик (см. Gorkavyi & Vasilkov, 2016; а также главу 10 основной части книги).

Отметим, что формула для гравитационного ускорения, использованная в (11), является классическим выражением для случая слабых полей и медленных скоростей. Поэтому, как детально показали Gorkavyi & Vasilkov (2016), данная антигравитация, которая определяется переменностью гравитационной массы, не имеет никакого отношения к координатной антигравитации, которую обсуждают Hilbert (1917) и ряд других авторов, и которая, с одной стороны – фиктивна, а с другой – появляется лишь возле радиуса Шварцшильда и на скоростях, близких к скорости света.

Можно предположить, что новый член уравнения (14), который описывает антигравитацию при уменьшении гравитационной массы, отвечает за механизм Большого взрыва. Насколько реалистичны условия, при которых обсуждаемая антигравитация будет сильнее гравитационного притяжения?

Рассмотрим Вселенную с массой M и радиусом R , которая, коллапсируя, уменьшает свою массу из-за превращения ее в гравитационное излучение. Умножим выражение (13) на c^2 и продифференцируем:

$$\frac{dE}{dt} = -\alpha M c^2 \quad (16)$$

где E - энергия гравитирующей материи. Из уравнения (14), с учетом (16), получим условие доминирования антигравитации над притяжением:

$$\alpha > \frac{c}{R} \quad \text{или} \quad -\frac{dE}{dt} > \frac{M c^3}{R} \quad (17)$$

Хотя это условие было получено формально для случая слабых полей, но можно ожидать, что оно будет выполняться для любых полей, потому что аналогичная формула получается и из квазиньютоновских уравнений (15), на которые не накладывались какие-либо ограничения (Gorkavyi, 2003). Для оценки излучения системой гравитационных волн можно воспользоваться общим выражением для мощности излучения (Мизнер, Торн, Уилер, 1977):

$$-\frac{dE}{dt} = S \left(\frac{GM}{Rc^2} \right)^5 \frac{c^5}{G} \quad (18)$$

Здесь мы ввели параметр несферичности S , который равен нулю для идеально сферической системы, и $S \sim 1$ для системы

типа двойной звезды. Отметим сильную зависимость мощности гравитационного излучения от радиуса R^{-5} - гораздо сильнее, чем зависит от этих параметров ньютоновская гравитационная сила. Тем самым, последняя будет безусловно проигрывать при коллапсе, стремящемся к достижению малых радиусов. Подставим (18) в (17) и получим условие доминирования антигравитации, если гравитационное излучение порождает достаточное уменьшение гравитационной массы:

$$S \left(\frac{GM}{Rc^2} \right)^5 \frac{c^5}{G} > \frac{Mc^3}{R} \quad (19)$$

Легко заметить, что это условие с точностью до коэффициента 2 и параметра S совпадает с условием нахождения внутри черной дыры:

$$S \left(\frac{GM}{Rc^2} \right)^4 > 1 \quad (20)$$

Рассмотрим S - параметр несферичности. Как показано во многих работах, гравитационный коллапс приводит к нарастанию несферичности (см. книгу Ландау и Лившица, 1973 и ссылки в ней). Физический смысл неустойчивости, приводящей к росту несферичности, можно изложить и на ньютоновском языке: малые флуктуации поверхности коллапсирующего шара будут неустойчивы из-за растяжения приливными силами, которые растут как R^{-3} - то есть тоже быстрее, чем рост гравитационного притяжения R^{-2} .

При сжатии Вселенной с 100 миллиардов световых лет до 10 светолет, ее радиус сокращается на 10 порядков (Вайнберг, 1975), увеличивая левую часть условия (20) на 40 порядков, поэтому можно предположить, что при любой степени несферичности S , условие (20) будет непременно выполнено.

Эти процессы должны протекать в черной дыре любого размера, что снимает общую проблему сингулярности: каждая система внутри радиуса Шварцшильда при сжатии испаряется в гравитационные волны и генерирует мощные силы отталкивания раньше, чем достигает сингулярности. Отметим, что это не противоречит теоремам Пенроуза-Хокинга, которые не применимы для систем с антигравитацией или положительной космологической постоянной (Hawking & Penrose, 1970).

Следовательно, Вселенная при коллапсе может сгенерировать достаточное количество гравитационного излучения, что вызовет быстрое уменьшение гравитационной

массы, сопутствующую мощную антигравитацию и обратный разлет сжатой и горячей Вселенной. Ускоренное расширение должно приводить к тем же эффектам сглаживания начальных неоднородностей Вселенной, что и инфляционное расширение. Тем самым, плодотворная идея ускоренного расширения Вселенной на ранних стадиях сохраняется в новой модели, переходя с гипотетических квантовых полей и микроскопических масштабов на классическое гравитационное поле (или искривление пространства) и астрономические масштабы.

Переменность гравитационной массы приводит к новой интерпретации величины c^5/G из (18) и (19), которая обычно рассматривается как предельная мощность гравитационного излучения (Мизнер, Торн, Уилер, 1977). Если взять выражение для массы черной дыры и продифференцировать его по времени, то получим

$$\frac{dM}{dt} = \frac{c^2}{2G} \frac{dr}{dt} \quad (21)$$

Переходя к энергии $E = Mc^2$ и полагая, что максимальная скорость изменения радиуса равна скорости света, получим

$$\frac{dE}{dt} = \frac{c^5}{2G} \quad (22)$$

Таким образом, величина c^5/G характеризует такую скорость изменения массы (или энергии) черной дыры, при которой скорость изменения ее радиуса достигает скорости света. Речь может идти, как о росте, так и об уменьшении массы. В последнем случае, возникает интересный вопрос о возможности выхода вещества из-под горизонта событий, если он будет сокращаться со сверхсветовой скоростью. Теоретически, сверхсветовое движение радиуса Шварцшильда не запрещено специальной теорией относительности, потому что граница черной дыры не является материальным объектом и может двигаться с произвольной скоростью.

Следовательно, переменность гравитационной массы, которая появилась благодаря корректному учету энергии гравитационных волн, решает проблему гравитационных сингулярностей – как космологической, так и внутри черных дыр. Эти расчеты свидетельствуют в пользу модели Вселенной, осциллирующей в черной дыре, которая развивается в работах Patria, 1972; Stuckey, 1994; Poplawski, 2016 и в данной книге.

2. Уравнения Фридмана для Вселенной с переменной массой

Модель с переменной гравитационной массой должна решать проблему современного ускорения Вселенной или положительной космологической постоянной. Можно предположить, что сильная антигравитация, возникшая во время коллапса и перехода части массы черных дыр в гравитационные волны, ослабела, но до сих пор ускоряет разлет поля галактик. Правда, это ставит под вопрос цикличность Вселенной – ведь ее замыкание лучше согласуется с ростом массы черных дыр из-за поглощения гравитационного излучения на фазе расширения Вселенной. Такой рост массы приводит к эффекту гипергравитации.

Так как эффекты антигравитации и гипергравитации описываются одной формулой, но разными знаками параметра α , то мы можем изучить в общем виде влияние гравитационного поля объекта с переменной массой на процесс расширения Вселенной. Выведем модифицированные уравнения Фридмана для метрики с переменной гравитирующей массой в сопутствующих координатах x_* , y_* , z_* :

$$ds^2 = [1 - b(t, r)]c^2 dt^2 - a(t, r)^2 [1 + b(t, r)](dx_*^2 + dy_*^2 + dz_*^2) \quad (23)$$

где $b(t, r) = \frac{2GM(t, r)}{rc^2} \ll 1$ - известная функция (см. выражения (2) или (9)), а $a(t, r)$ - неизвестный масштабный фактор. Метрика (23) была исследована, например, МакВитти (1961), Dodelson (2003), Koreikin (2012). Согласно разделу 16.2 в монографии Крамера и др. (1982), метрика (23) принадлежит к типу сферически симметричных нестационарных метрик, которые допускают введение изотропных сопутствующих координат. Мы будем искать модифицированные уравнения Фридмана в таких координатах. Зависимость функций $a(t, r)$ и $b(t, r)$ от координат означает, что мы рассматриваем слабо неоднородную космологическую модель. Функция $b(t, r)$ в метрике (23) является возмущением классической метрики FLRW (Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker), например, от роста БЧД или

Большой Черной Дыры (Big Black Holes \equiv ВВН) и приводит к появлению в уравнениях Фридмана дополнительных членов. Аналогичную метрику с возмущением рассматривает, например, Dodelson (2003) – см. его уравнение 5.27 для мелкомасштабных возмущений плотности. В отличие от Dodelson (2003), мы будем рассматривать крупномасштабные возмущения, связанные с переменностью гравитационной массы. В статье Gorkavii & Vasilkov (2018) было показано, что слабая неоднородность времени $1 - b(t, r)$ не существенна в рассматриваемом приближении. В итоговое модифицированное уравнение Фридмана входят возмущения $b(t, r)$ только из пространственной части метрики. Поэтому для упрощения расчетов, мы опустим эту слабую неоднородность по времени и в конечных выражениях примем, что $g_{00} = -1$. Запишем нулевую компоненту уравнений Эйнштейна:

$$R_{00} - \frac{1}{2}g_{00}R = -\frac{8\pi G}{c^4}T_{00} \quad (24)$$

После громоздких, но стандартных вычислений величин R_{00} (нулевая компонента тензора Риччи) и R (скалярная кривизна), получим для левой части (24) следующее выражение:

$$\begin{aligned} R_{00} - \frac{1}{2}g_{00}R = & -\left(\frac{1}{2g_{11}}\frac{\partial g_{11}}{\partial t}\right)\left(\frac{1}{2g_{22}}\frac{\partial g_{22}}{\partial t}\right) - \left(\frac{1}{2g_{11}}\frac{\partial g_{11}}{\partial t}\right)\left(\frac{1}{2g_{33}}\frac{\partial g_{33}}{\partial t}\right) - \\ & \left(\frac{1}{2g_{22}}\frac{\partial g_{22}}{\partial t}\right)\left(\frac{1}{2g_{33}}\frac{\partial g_{33}}{\partial t}\right) - g_{00}\left(\frac{1}{2g_{11}g_{22}}\frac{\partial^2 g_{22}}{\partial x_*^2} + \frac{1}{2g_{11}g_{33}}\frac{\partial^2 g_{33}}{\partial x_*^2} + \right. \\ & \left. \frac{1}{2g_{11}g_{22}}\frac{\partial^2 g_{11}}{\partial y_*^2} + \frac{1}{2g_{22}g_{33}}\frac{\partial^2 g_{33}}{\partial y_*^2} + \frac{1}{2g_{11}g_{33}}\frac{\partial^2 g_{11}}{\partial z_*^2} + \frac{1}{2g_{22}g_{33}}\frac{\partial^2 g_{22}}{\partial z_*^2}\right) \end{aligned} \quad (25)$$

Здесь было учтено, что $b(t, r) \ll a(t, r)$, поэтому членами, нелинейными по $b(t, r)$, пренебрегалось (см. соответствующие оценки членов уравнений в статье Gorkavii & Vasilkov, 2018). Корректность вывода (25) была также проверена вторым способом, с использованием общих выражений из параграфа 100 книги Толмена (1974). Введем следующее обозначение суммы всех членов со вторыми производными по пространственным координатам:

$$\begin{aligned} \Lambda(t, r) = & \frac{1}{2g_{11}g_{22}}\frac{\partial^2 g_{22}}{\partial x_*^2} + \frac{1}{2g_{11}g_{33}}\frac{\partial^2 g_{33}}{\partial x_*^2} + \frac{1}{2g_{11}g_{22}}\frac{\partial^2 g_{11}}{\partial y_*^2} + \\ & \frac{1}{2g_{22}g_{33}}\frac{\partial^2 g_{33}}{\partial y_*^2} + \frac{1}{2g_{11}g_{33}}\frac{\partial^2 g_{11}}{\partial z_*^2} + \frac{1}{2g_{22}g_{33}}\frac{\partial^2 g_{22}}{\partial z_*^2} \end{aligned} \quad (26)$$

Выражения с производными по времени от $a(t, r)$ приводят к $(\frac{\dot{a}}{a})^2$ - изотропному квадратичному члену первого уравнений Фридмана. Производная по времени от возмущения $b(t, r)$ дает поправку следующего порядка $\frac{\dot{a}}{a}\dot{b}$. Эта поправка является анизотропной, потому что $b(t, r)$ зависит от расстояния до растущей ВВН, следовательно, в направлении на ВВН этот член будет больше, чем в противоположном. С учетом (25) запишем первое модифицированное уравнение Фридмана для слабого поля:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{\dot{a}}{a}\dot{b} = \frac{\Lambda(t, r)c^2}{3} + \frac{8\pi G\rho}{3} \quad (27)$$

где в функции $\Lambda(t, r)$ можно оставить только члены с $b(t, r)$, которые для $\alpha \gg \frac{c}{R}$ сильнее зависят от пространства, чем $a(t, r)$ (см. соответствующие оценки членов уравнений в Gorkavii & Vasilkov, 2018):

$$\Lambda(t, r) = \frac{1}{a^2} \left(\frac{\partial^2 b}{\partial x_*^2} + \frac{\partial^2 b}{\partial y_*^2} + \frac{\partial^2 b}{\partial z_*^2} \right) = \frac{\partial^2 b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 b}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 b}{\partial z^2} \quad (28)$$

Здесь x, y, z – физические координаты и учтено, что скалярная функция $\Lambda(t, r)$ не зависит от системы координат. Обратим внимание, что эта функция является симметричной по всем пространственным координатам, тем самым она является локально изотропной. Тем не менее, так как $b(t, r)$ зависит от расстояния до ВВН, то глобально эта функция будет неоднородной и анизотропной. В выражение (28) входят только пространственные компоненты метрического тензора, тем самым слабая неоднородность по времени оказалась несущественной для функции $\Lambda(t, r)$. Из уравнения (28) для $|\alpha| \gg c/r$ получим

$$\Lambda(t, r) \approx \frac{\alpha^2}{c^2} b(t, r) = \frac{\alpha^2 r_0}{c^2 r} \approx 0.7 * 10^{-56} (\alpha T)^2 \frac{r_0}{r} \text{ см}^{-2} \quad (29)$$

где $r_0 = \frac{2GM(t, r)}{c^2}$ – радиус Шварцшильда, $T = 4 * 10^{17}$ сек – космологическое время. Сравним (29) с измеренным значением космологической постоянной (Ade et al., 2016a):

$$\Lambda(t, r) \approx 1.1 * 10^{-56} \text{ см}^{-2} \quad (30)$$

Функция (26), (29), описывающая ускорение Вселенной, совпадает с феноменологической космологической постоянной, при следующем значении безразмерной величины

$$(\alpha T)^2 \frac{r_0}{r} \approx 1.6 \quad (31)$$

Существует принципиальная разница между ростом массы черной дыры за счет аккреции обычного вещества и за счет притока гравитационного излучения. Только в последнем случае можно говорить о росте гравитационной массы системы, потому что аккреция обычного вещества на черную дыру представляет собой лишь перераспределение гравитационной массы по пространству, сопровождающееся гравитационным излучением, то есть в этом случае гравитационная масса системы будет даже уменьшаться. В статье Gorkavui et al. (2018) была определена плотность среды гравитационных волн ρ_{GW} , при поглощении которых гравитационная масса ВВН растет со скоростью, достаточной для наблюдаемого значения космологической постоянной:

$$\dot{M} = -\alpha M = 27\pi r_0^2 c \rho_{GW} \quad (32)$$

Это выражение несущественно отличается от соответствующей формулы в Gorkavui et al (2018) из-за уточнения выражения для площади черной дыры (Новиков и Фролов, 1986). Из (32) и выражения для радиуса Шварцшильда, получим

$$\rho_{GW} = \frac{|\alpha|c^3}{108\pi G^2 M} \sim 10^{-28} \text{ г/см}^3 \quad (33)$$

где $|\alpha|T=10$ и масса $M = 6 * 10^{54}$ г (эта масса ВВН может быть вычислена из условия $r_0/r = 0.02$. Если положить $|\alpha|T=100$, то $r_0/r = 2 * 10^{-4}$ и масса $M = 6 * 10^{52}$ г, а $\rho_{GW} \sim 10^{-25}$ г/см³. Если учесть, что возмущение гравитационного поля от ВВН, которое сейчас наблюдается в виде ускоренного разбегания галактик, возникло ~10 млрд лет назад, то за это время плотность фона гравитационного излучения (33) может значительно уменьшиться.

Попробуем оценить фон гравитационных волн другим способом. Логично предположить, что когда радиус Большой Черной Дыры будет сопоставим с радиусом Вселенной, то

радиус этой дыры, из-за поглощения фонового гравитационного излучения, будет увеличиваться со скоростью, близкой к скорости света. Из (22) можно записать условие такого роста (приняв для площади поглощения ВВН самую простую оценку $4\pi R^2$):

$$\frac{dE}{dt} \sim \rho_{GW} c^3 4\pi R^2 \sim \frac{c^5}{2G} \quad (34)$$

откуда получим

$$\rho_{GW} \sim \frac{c^2}{8\pi G R^2} \sim 10^{-29} \text{ г/см}^3 \quad (35)$$

где радиус ВВН $R \sim 10^{10}$ св. лет. Примечательна близость оценок (33) и (35), полученных совершенно различными способами. К значению (35) близка также критическая плотность, приводящая к замкнутости Вселенной: $\rho_{crit} \sim \frac{3H^2}{8\pi G}$. Это еще одно многозначительное совпадение, которого говорит о высокой согласованности различных параметров Вселенной.

Второе модифицированное уравнение Фридмана получаем обычным способом, дифференцируя первое уравнение Фридмана (27):

$$\frac{\ddot{a}}{a} = \frac{\Lambda(t,r)c^2}{3} + \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{\dot{b}}{2} + \frac{\frac{\lambda(t,r)c^2}{6} + \frac{4\pi G\dot{\rho}}{3}}{\sqrt{\frac{\Lambda(t,r)c^2}{3} + \frac{8\pi G\rho}{3}}} \quad (36)$$

Отметим, что в обоих уравнениях Фридмана (27) и (36) ρ означает среднюю плотность Вселенной. Функции $\Lambda(t,r)$, \dot{b} и \ddot{b} зависят от переменной гравитационной массы, расположенной вдали, на краю наблюдаемой Вселенной. Используя уравнение (29), для экспоненциального изменения массы ВВН получим $\ddot{b}(t,r) = \Lambda(t,r)c^2$, после чего (36) можно переписать в виде:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{\Lambda(t,r)c^2}{6} + \frac{8\pi G\rho}{3} + \frac{\frac{\lambda(t,r)c^2}{6} + \frac{4\pi G\dot{\rho}}{3}}{\sqrt{\frac{\Lambda(t,r)c^2}{3} + \frac{8\pi G\rho}{3}}} \quad (37)$$

Рассмотрим случай, когда член с космологической функцией доминирует над членом со средней плотностью. С учетом (13), получаем $\dot{\Lambda}(t,r) = -\alpha\Lambda(t,r)$. Тогда уравнение (37) может быть переписано в простом виде:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{\Lambda(t,r)c^2}{6} - \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{\Lambda(t,r)c^2}{3}} \quad (38)$$

Первое уравнение Фридмана (27) для пренебрежимо малой плотности среды запишем в виде:

$$\Lambda(t,r)c^2 = 3(H^2 + H\dot{b}) \quad (39)$$

где $H = \frac{\dot{a}}{a}$ – параметр Хаббла. Второе уравнение Фридмана (36) примет вид:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{1}{2}(H^2 + H\dot{b}) - \frac{\alpha}{2} \sqrt{H^2 + H\dot{b}} \approx -\frac{1}{2}(H^2 + \alpha H) \approx -\frac{\alpha H}{2} \quad (40)$$

Записывая приближенные равенства в (40), мы предположили сначала, что членом с $H\dot{b}$ можно пренебречь по сравнению с H^2 , а потом учли, что $|\alpha| \gg c/r$ или $|\alpha| \gg H$.

Неожиданный результат: из уравнения (40) следует, что ускорение наблюдаемой части Вселенной $\frac{\ddot{a}}{a} > 0$ определяется эффектом гипергравитации при $\alpha < -H$, вызванным увеличением гравитационной массы ВВН. Гипергравитация от растущей ВВН растягивает наблюдаемый набор галактик так, что с точки зрения сопутствующего локального наблюдателя, галактики удаляются друг от друга с ускорением. Отметим, что схожая идея, связывающая современное ускорение Вселенной не с темной энергией, а с глобальной волной пространства-времени, рассматривается в работе Temple & Smoller (2009).

Полученный результат изящно совмещает решение проблемы положительной космологической постоянной с решением проблемы замкнутости Вселенной ввиду роста ее массы. Кроме того, в рассматриваемой модели «космологическая постоянная» $\Lambda(t,r)$ является функцией массы ВВН и плотности фоновых гравитационных волн ρ_{GW} , тем самым она зависит от времени, что может объяснить меньшее значение постоянной Хаббла H в прошлом (Riess, 2020).

Оценим относительную величину нового анизотропного члена $H\dot{b}$ в уравнении Фридмана (40), с учетом (29) и (31), и разных возможных значений r_0/r , обсуждавшихся после (33):

$$\frac{\dot{b}}{H} = -\frac{\alpha T r_0}{HT r} = -\frac{1}{HT} \sqrt{1.6 \frac{r_0}{r}} \sim -\frac{0.018-0.18}{HT} \quad (41)$$

С учетом $HT \sim 1$, оценка анизотропии (41) в максимальном варианте хорошо соответствует анизотропии постоянной Хаббла, полученной по скоплениям галактик (Migkas et al, 2020). Тем самым, вопрос анизотропии естественно решается в новой модели.

Вышеприведенные формулы относятся к модели Фридмана, предполагающей изотропию и однородность Вселенной, или к модификации этой модели для слабой неоднородности и анизотропии. Если учесть, что Вселенная квазиоднородна только локально (в пределах области, доступной нам в наблюдениях), а в глобальном смысле она неоднородна, то космология реальной Вселенной будет гораздо богаче. Циклическая модель Вселенной сочетает в себе внешнюю стационарную Мегадыру с пульсирующей внутренней частью, которая приблизительно совпадает с наблюдаемой частью Вселенной. Мегадыра может иметь радиус $\sim 0.1-1$ триллиона световых лет. Критическая плотность для такой дыры на несколько порядков меньше оценок (35). Эта плотность может определяться практически полностью гравитационными волнами. Внутренняя, осциллирующая часть Вселенной может иметь гораздо более высокую плотность – как барионной, так и других компонент. Глобальная неоднородность Вселенной может приводить к тому, что ее внутренняя, сравнительно компактная часть с радиусом около 50 миллиардов световых лет будет описываться уравнениями Фридмана (27) и (36), в то время как вся Вселенная, включая ее внешнюю разреженную часть, будет точнее описываться уравнением Фридмана, включающим кривизну пространства: $\frac{kc^2}{a^2}$, где $k = 1$ для замкнутой Вселенной с положительной кривизной. Дальнейшие исследования и наблюдения должны уточнить степень глобальной неоднородности Вселенной.

3. Темная материя и эволюция черных дыр в циклических моделях

Запишем уравнение непрерывности для изменения массы популяции черных дыр:

$$\frac{dnm}{dt} = A(n, m) - B(n, m) \quad (42)$$

где $A(n, m)$ - член, характеризующий рост общего числа n и средней массы m черных дыр, а $B(n, m)$ описывает уменьшение этих величин. Пусть звездная эволюция в каком-то цикле Вселенной породила начальную популяцию черных дыр с численностью n_0 и массами дыр m_0 . Рассмотрим простую модель, в которой процессы уменьшения общего числа черных дыр и рост индивидуальной массы дыр независимы. Тогда, перейдя к итерациям в заданный интервал времени, из уравнения (42) можно получить отдельное уравнение для числа черных дыр:

$$n_{i+1} = n_i(1 - D) \quad (43)$$

и отдельную формулу для массы черных дыр:

$$m_{i+1} = m_i(1 + Cm_i) \quad (44)$$

где

$$C = \frac{27\pi G^2}{c^3} T_a \rho_a \quad (45)$$

Формула (44) получена с учетом того, что площадь сечения черных дыр пропорциональна квадрату их радиуса, а, следовательно, и массы. Выражение (45) предполагает скорость движения среды равной скорости света, но оно может описывать и механизм обычной аккреции Бонди-Хойла, если в (45) скорость света заменить на скорость звука, а также подкорректировать численный коэффициент. Мы рассматриваем C как параметр модели, поэтому конкретное выражение для C несущественно для расчетов.

Формула (43) предполагает, что число черных дыр за каждую итерацию сокращается на постоянную долю D . Формулы (44)-(45) описывают рост отдельной черной дыры при поглощении вещества с плотностью ρ_a за время T_a (Горькавый и Тюльбашев, 2021). Чтобы итерационная формула достаточно точно описывала процесс, параметр D и функция Cm_i должны быть гораздо меньше единицы в рассматриваемом заданном интервале времени:

$$D \ll 1 \text{ и } Cm_i \ll 1 \quad (46)$$

Интервал времени обычно можно приравнять продолжительности одного цикла Вселенной, но если масса дыры в формуле (44) становится достаточно большой, то второе неравенство (46) перестает выполняться. Тогда интервал итерации будем задавать настолько маленьким, чтобы условие

(46) выполнялось. Из (43) следует, что численность начальной популяции постоянно уменьшается из цикла цикл. Согласно (44), индивидуальная масса черных дыр растет медленно, пока в течение цикла выполняется условие (46). В результате, масса популяции черных дыр уменьшается с каждой итерацией, пока параметр St_i не вырастет. После этого быстрый рост индивидуальных масс дыр приводит к тому, что общая масса популяции данного возраста будет нарастать от цикла к циклу, несмотря на постоянное падение численности популяции (более детально результаты моделирования обсуждаются в разделе 12.1 основного текста).

Время в рассматриваемой итерационной модели и реальное время не имеют прямой связи, потому что модель предполагает постоянную плотность питающей среды, в то время как в реальности она меняется. В обеих моделях масса популяции черных дыр для отдельно взятого цикла переходит от уменьшения к росту при индивидуальных массах дыр $m_{cr} \sim D/C \sim 100$ масс Солнца. Принятое в Модели 1 значение C соответствует $T_a \rho_a = 0.6$ из формулы (45), где время питания черной дыры дано в годах, а плотность питающей среды – в $г/см^3$. Значение D в Модели 1 означает, что на каждом цикле популяция черных дыр сокращается на 5%.

Из результатов моделирования можно сделать вывод, что вся темная материя может состоять из черных дыр. Можно ли согласовать это заключение, а также частые слияния черных дыр, наблюдаемые LIGO, с малым количеством событий гравитационного линзирования? Garcia-Bellido & Clesse (2017) показали возможность такого согласования, если предположить существование кластеров черных дыр со средним числом дыр ~ 2000 . Оценим частоту слияний черных дыр N_{merg} для одной галактики. Пусть темное гало с массой M_{halo} состоит из N_{DGC} темных шаровых скоплений со средней массой M и радиусом R . Каждое скопление содержит N_{BH} черных дыр с массой m и радиусом r . Можно записать следующую оценку частоты слияний черных дыр:

$$N_{merg} = N_{DGC} N_{BH} \frac{1}{t_{coll}} \quad (47)$$

где t_{coll} – время свободного пробега дыры в шаровом скоплении со средней концентрацией черных дыр n_{BH} :

$$\frac{1}{t_{coll}} = 4\pi r^2 \left(1 + \frac{Gm}{rV^2}\right) n_{BH} V \quad (48)$$

где V - скорость движения черной дыры в скоплении. В скобках содержится фактор гравитационной фокусировки (см., например, Горькавый и Фридман, 1994). Оценивая $\frac{Gm}{rV^2} \sim \frac{c^2}{V^2} \gg 1$ и учитывая, что $V \approx \sqrt{\frac{GM}{R}}$, $n_{BH} = \frac{3N_{BH}}{4\pi R^3}$, $N_{DGC} = \frac{M_{halo}}{mN_{BH}}$, получим количество слияний черных дыр в темном гало из шаровых скоплений для одной галактики за год:

$$N_{merg} = \frac{6GM_{halo}}{c} \sqrt{\frac{2N_{BH}r}{R^5}} \quad (49)$$

Если гало с массой $M_{halo} \sim 10^{12}$ солнечных масс состоит из темных шаровых скоплений со средним количеством черных дыр в $N_{BH} \sim 10^4$ (см. раздел 15.1 основного текста) и с массой дыр в $m \sim 5$ масс Солнца, то принимая оценку для радиуса темного шарового скопления в $R \sim 10$ световых лет, получим число слияний на галактику в год $N_{merg} \sim 10^{-6}$. Если оценить число галактик на гигапарсек в кубе как $\sim 10^9$, то это даст частоту соударений около 1000 слияний в год на гпс³. Частота соударений крупных черных дыр с массой $\sim 30 M_{\odot}$ может быть на порядок меньше, что соответствует частоте слияний, регистрируемых детекторами LIGO.

Для формирования темного гало с массой в $\sim 10^{12} M_{\odot}$ потребуется $\sim 10^7$ темных шаровых скоплений с массами в $M \sim 5 \cdot 10^4 M_{\odot}$. Число темных шаровых кластеров внутри тонкого газового диска Галактики может быть $\sim 10^5$ штук. Если радиус черного шарового скопления ~ 10 световых лет, и они располагаются на расстоянии $\sim 10^5$ световых лет, то на небе общая площадь темных шаровых скоплений составит $\lesssim 10^3$ кв. градуса. Равномерное распределение темных шаровых скоплений по всей небесной сфере с площадью в 41253 кв. градуса означает малую ($\sim 2\%$) вероятность того, что такое скопление попадет на линию между телескопом и, например, звездами Магеллановых облаков. Следовательно, LIGO регистрирует слияние реликтовых дыр и нейтронных звезд из темных шаровых скоплений, которые трудно обнаружить в проектах по поиску гравитационного линзирования звезд соседних галактик.

4. Осциллирующая Вселенная и проблема роста энтропии

Одной из главных проблем циклической космологией является рост энтропии и отсутствие механизма возвращения расширяющейся Вселенной к коллапсу. Покажем, что обсуждаемая космологическая модель решает эти проблемы без дополнительных предположений. Согласно известным работам Бекенштейна и Хокинга (Bekenstein, 1973; Hawking, 1975), черные дыры обладают огромной энтропией, которая пропорциональна площади их поверхности, зависящей от массы m в квадрате:

$$Ent = \frac{4\pi Gk}{hc} m^2 \quad (50)$$

где k – постоянная Больцмана. Как следует из расчетов ряда авторов (Penrose, 2006; Frampton et al, 2009; Egan & Lineweaver, 2010), практически вся энтропия Вселенной содержится в черных дырах, которые превосходят по энтропии на 15 порядков все остальные компоненты Вселенной (раздел 13.1 и Таб. II в основном тексте).

Из формулы (50) получим следующую оценку величины энтропии для популяции черных дыр: $Ent \sim 10^{77} m^2 N [k]$, где N – количество черных дыр с массой m , указанной в солнечных массах. Энтропия для популяции черных дыр в $30 M_{\odot}$ и $N = 10^{22}$ (максимальная оценка из предположения, что черные дыры составляют всю темную материю): $Ent \sim 10^{102} [k]$. Энтропия всего одной ВВН с $m \sim 3 * 10^{21} M_{\odot}$ равна $Ent \sim 10^{120} [k]$, что на 18 порядков больше энтропии всех SBH – и это соотношение увеличится еще больше при дальнейшем росте ВВН. Таким образом, практически вся энтропия Вселенной будет содержаться в Большой Черной Дыре, возникшей в данном цикле. За космологическое время излучение Хокинга является несущественным даже для небольших дыр звездных масс, при этом темп аккреции реликтового излучения на черные дыры в обозримом будущем будет превосходить потери массы из-за излучения Хокинга. Считая черные дыры неуничтожимыми объектами, проблему энтропии можно сформулировать так: как избавиться с ВВН, возникающей при каждом цикле Вселенной?

Проблема энтропии или наличия большой черной дыры решается в обсуждаемой циклической модели Вселенной

автоматически. Энтропия Бекенштейна-Хокинга определена только для наружного наблюдателя, который фиксирует определенную тепловую температуру черной дыры. Температура и энтропия черной дыры не могут быть определены для внутреннего наблюдателя, следовательно, не существуют для него. Поэтому в рамках ОТО есть только один способ избавиться как от ВВН, так и от энтропии, накопленной в ходе данного цикла Вселенной - это попасть внутрь этой большой черной дыры и начать там новый космологический цикл.

Галактики, падая внутрь большой черной дыры, оказываются в системе, энтропия которой на два десятка порядков меньше энтропии Вселенной на стадии ее разлета. Это скачкообразное уменьшение энтропии очевидно проявляется на динамике вещества и излучения: если на стадии разлета Вселенной плотность вещества падала, как и температура фонового излучения, то после попадания наблюдателя внутрь большой черной дыры плотность вещества вокруг него начинает расти, как и температура излучения.

Рост ВВН и поглощение ею всего вещества Вселенной решает проблему остановки Вселенной и ее последующего коллапса и превращает космологическую модель отскока в циклическую модель. Хорошо известно, что средняя плотность, необходимая для замыкания Вселенной, близка к плотности черной дыры размером с Вселенную. Наблюдаемая средняя плотность вещества Вселенной меньше необходимой для ее замыкания, но если ВВН растет, поглощая не только обычную материю и электромагнитное излучение, но и фоновые гравитационные волны, оценка энергии которых была дана выражениями (33) и (35), то общая гравитационная масса Вселенной будет со временем увеличиваться, достигая критического значения. При этом поверхность большой черной дыры разрастется настолько, что она поглотит все ныне наблюдаемые галактики и звезды, которые окажутся внутри ВВН.

Это поглощение никак не скажется на существовании галактик, потому что, согласно принципу эквивалентности ОТО, падение в достаточно большую черную дыру для падающего наблюдателя ничем принципиально не отличается от состояния покоя. Приливные силы на границе столь большой черной дыры

будут слишком малы, чтобы повлиять на динамику или форму отдельных галактик. Поверхность большой черной дыры, поглотив все вещество, уходит на периферию Вселенной, а внутри БЧД галактики начинают новый цикл существования в условиях пониженной энтропии. Наличие границы мегадыры (или БЧД прошлого цикла) на периферии Вселенной является существенным фактором для разлета галактик: как бы далеко они не улетели, они не могут уйти дальше этой границы, а, следовательно, будут заторможены и будут проглочены новой большой черной дырой, растущей от центра Вселенной.

Остановка разбегания вещества Вселенной на внутренней поверхности черной дыры (с точки зрения покоящегося наблюдателя и метрики Шварцшильда) эквивалентна топологической замкнутости Вселенной (с точки зрения сопутствующего наблюдателя и уравнения Фридмана). Если мы живем в замкнутой Вселенной, то у нее должна быть небольшая положительная кривизна. Действительно, в данных WMAP и "Планка" есть убедительные указания на положительную кривизну пространства, что противоречит предсказаниям теории инфляции и служит доводом в пользу замкнутости Вселенной (Efstathiou, 2003; Handley, 2019; Valentino et al, 2020).

Можно сделать вывод, что Вселенная является замкнутой системой или объектом с переменной гравитационной массой, пульсирующим внутри огромной черной дыры. Близкие модели рассматривались и другими авторами (Patria, 1972; Stuckey, 1994; Poplawski, 2016).

5. Реликтовые гравитационные волны в осциллирующей Вселенной

Самыми мощными известными источниками гравитационного излучения являются сливающиеся черные дыры. В 2015 году детектор LIGO обнаружил гравитационные волны с частотой $f_{LIGO} \sim 10^2$ Гц, вызванных слиянием черных дыр звездных масс (Abbot et al., 2016). В конце 2020 года консорциум NANOGrav объявил об открытии изотропного стохастического фона гравитационных волн (GWB) с низкой частотой $f_{GWB} \sim 2.5 * 10^{-9} - 1.2 * 10^{-8}$ Гц (или 2.5-12 наногерц) и амплитудой $h \sim 10^{-15}$ (Arzoumanian et al., 2020). Предполагается, что такие волны длиной около светового года

генерируются современными двойными сверхмассивными черными дырами (Сажин, 1978; Detweiler, 1979; Jaffe & Baker, 2003). Были выдвинуты и другие гипотезы происхождения GWB: от коллапсирующих флуктуаций на ранних стадиях Большого взрыва (Nguyen et al., 2020; Luca et al., 2021) до разрыва космических струн (Buchmuller et al., 2021).

Рассмотрим, следуя статье Gorkavyi (2022a), формирование GWB в циклической Вселенной с большим количеством черных дыр (см. рис. 8 в основном тексте). Очевидно, что при коллапсе Вселенной значительная часть массы сливающихся черных дыр превращается в гравитационные волны. Эпоха множественного слияния черных дыр начинается, когда Вселенная сжимается от современного состояния в $\sim 10^{10}$ раз - до нескольких световых лет, и ее объем становится сопоставим с общим объемом существующих ЧД. Мы предполагаем, что длинноволновое гравитационное излучение, зарегистрированное NANOGrav (Arzoumanian et al., 2020), является реликтовым гравитационным излучением от множественного слияния черных дыр во время Большого Сжатия. Это излучение уменьшило частоту (или увеличило длину волны) на 10 порядков в ходе космологического расширения: $f_{GWB} \sim f_{LIGO} * 10^{-10}$.

Оценим современные частоты и амплитуды гравитационных волн, образовавшихся во время Большого Сжатия. Уравнение для амплитуды гравитационного излучения двойной системы черных дыр одинаковой массы M , расположенной на расстоянии D от наблюдателя, можно записать как (Jaffe & Baker, 2003):

$$h = 4 \sqrt{\frac{2}{5}} \left(\frac{GM}{c^3} \right)^{5/3} \left(\frac{2\pi}{T} \right)^{2/3} \left(\frac{c}{D} \right) \quad (51)$$

где T - период собственного вращения двойной системы. Формула (51) и последующие уравнения получены в случае асимптотически плоского пространства-времени. В случае замкнутой Вселенной, формулы для длины и массы включают множитель $1/\sqrt{1 - (D/R_U)^2}$, где R_U - радиус кривизны Вселенной (см., например, Peebles, 1993). Мы будем использовать формулу (51) и другие уравнения этого раздела, предполагая, что обсуждаемые расстояния меньше радиуса кривизны Вселенной $(D/R_U)^2 \ll 1$. Характерное время

гравитационного излучения такой системы можно получить из уравнения (Jaffe & Baker, 2003):

$$\frac{1}{\tau} = \frac{96}{5} \left(\frac{GM}{c^3} \right)^{5/3} \left(\frac{2\pi}{T} \right)^{8/3} \quad (52)$$

Амплитуда и частота гравитационной волны достигают своего максимального значения, а период - минимального значения непосредственно перед слиянием черных дыр. В этом случае (51) и (52) упрощаются. Максимальная частота гравитационного излучения при слиянии двух одинаковых черных дыр записывается в виде (см., например, Wen et al., 2009):

$$f = \frac{2}{T(1+z)} = \frac{c}{12\sqrt{6} \pi R(1+z)} \approx \frac{2.2 \cdot 10^3}{M_s(1+z)} \quad (53)$$

где M_s - масса черной дыры в массах Солнца ($M_\odot = 2 \cdot 10^{33}$ г), f измеряется в герцах. Выражение $(1+z)$ в знаменателе (53) описывает уменьшение частоты из-за космологического красного смещения, а коэффициент 2 в числителе появляется из-за квадрупольной природы гравитационного излучения (Arzoumanian et al., 2020). Из (53) получаем, что слияние черных дыр с массой ~ 10 солнечных масс дает собственную частоту генерируемых гравитационных волн $f_0 \sim \frac{2}{T} \sim 2.2 \cdot 10^2$ Гц, что типично для наблюдений LIGO (Abbot et al., 2016). Учитывая (53) и $z \sim 1.6 \cdot 10^{10}$, получаем наблюдаемую частоту гравитационного стохастического излучения $f \sim 1.4 \cdot 10^{-8}$ Гц, которая совпадает с частотой волн, обнаруженных NANOGrav. Из (53) получаем минимальное значение периода:

$$T = \frac{24\sqrt{6} \pi R}{c} \quad (54)$$

и подставляем (54) в (51). Учитывая уравнение для радиуса черной дыры $R = \frac{2GM}{c^2}$, получим:

$$h \approx \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2}{5}} \frac{R}{D} \quad (55)$$

Для объединения двух ЧД с $R = 10^7$ см, расположенных от нас на расстоянии $D \sim 10^9$ световых лет, мы получаем типичную амплитуду GW, зарегистрированную LIGO: $h \sim 10^{-21}$ (Abbot et al., 2016). Уравнение (52) также упрощается для случая максимальной частоты (54):

$$\frac{1}{\tau} \approx \frac{4}{135} \frac{c}{R} \quad (56)$$

Чтобы оценить полную энергию гравитационного излучения сливающихся черных дыр, возведем в квадрат амплитуду (55) и запишем:

$$h^2 \approx \frac{2}{45} \left(\frac{R}{D}\right)^2 N \frac{\tau}{t_0} \quad (57)$$

где t_0 - время свободного пробега ЧД, движущейся со скоростью V , до столкновения и слияния с другой ЧД (Новиков и Фролов, 1986):

$$\frac{1}{t_0} = 108 \pi R^2 n V \quad (58)$$

где $n = \frac{3N}{4\pi a^2}$ - концентрация черных дыр, расположенных в сфере радиуса a . Отношение $\frac{\tau}{t_0}$ характеризует долю времени, в течение которой дыра излучает, сливаясь с другой дырой. Из уравнения (57), с учетом (56), (58), получаем для средней амплитуды фоновых гравитационных волн, генерируемых SBH во время Большого Сжатия:

$$h \approx 9 \sqrt{\frac{3NR^{5/2}}{2Da^{3/2}}} \sqrt{\frac{V}{c}} \sim 10^{-15} \quad (59)$$

где для оценки было взято $N = 10^{22}$ (Горькавый и Тюльбашев, 2021); $R = 10^7$ см; $D \sim 10^{10}$ световых лет; $a = 3$ световых года; $V \sim c$ (предполагая, что относительные скорости черных дыр в максимально сжатой Вселенной сравнимы со скоростью света). Предположение о накоплении черных дыр и GWB от цикла к циклу Вселенной (Горькавый и Тюльбашев, 2021) изменяет смысл параметров в уравнении (59), например, N будет означать сумму источников GWB за определенное количество циклов. Сравним амплитуды фоновых гравитационных волн от слияния SBH при Большом Сжатии $z \sim 10^{10}$ и от слияния SMBH в более позднее время (z порядка единицы):

$$\frac{h_{SBH}}{h_{SMBH}} \approx \left(\frac{R_{SBH}}{R_{SMBH}}\right)^{5/2} \left(\frac{a_{SMBH}}{a_{SBH}}\right)^{3/2} \left(\frac{N_{SBH}}{N_{SMBH}}\right) A \sim 10^{11} \quad (60)$$

Здесь приняты следующие оценки:

$$\frac{R_{SBH}}{R_{SMBH}} \sim 10^{-6}; \quad \frac{a_{SMBH}}{a_{SBH}} \sim 10^{10}; \quad \frac{N_{SBH}}{N_{SMBH}} \sim 10^{11} \quad (61)$$

Последний множитель в (60) несущественен, потому что он достаточно близок к 1:

$$A = \left(\frac{D_{SMBH}}{D_{SBH}}\right) \sqrt{\frac{V_{SBH}}{V_{SMBH}}} \sim 1 \quad (62)$$

Мы можем получить оценки фоновых волн, генерируемых черными дырами на разных этапах эволюции Вселенной (см. Таблицу III в основном тексте, где масса SMBH в 10^6 раз больше SBH). Из (60) и Таблицы II следует, что амплитуда стохастических гравитационных волн, вызванных слиянием SBH на стадии Большого Сжатия, значительно превышает амплитуду волн, генерируемых современными слияниями SMBH в центрах галактик. Слияние во время Большого Сжатия SMBH с массой $\sim 10^{7-10} M_{\odot}$ будет генерировать излучение с частотой $f_0 \sim 10^{-4} - 10^{-7}$. Принимая во внимание $z \sim 10^{10}$, получаем, что в современную эпоху должны быть очень длинные гравитационные волны с частотой $f \sim 10^{-14} - 10^{-17}$ Гц. Такие волны имеют длину, равную $\sim 10^{-1} - 10^{-4}$ от размера Вселенной. Из уравнения для амплитуды (59) следует, что слияние сверхмассивных черных дыр в момент Большого Сжатия будет генерировать GWB со значительной амплитудой. Например, для частоты $f \sim 10^{-14}$ Гц амплитуда GW будет в $\sim 10^4$ раз больше, чем амплитуда GW, обнаруженная NANOGrav (Arzoumanian et al., 2020) (см. Таблицу II). Обнаружение таких длин волн возможно с использованием данных астрометрического спутника *Gaia* (Gwinn et al., 2019; Book, Flanagan, 2011; Moore et al., 2017).

Таблица II. Оценки амплитуды и частоты GWB от разных источников.

Источник \расстояние	Большое сжатие, $z \sim 10^{10}$	$z \sim 1$
SBH	$h \sim 10^{-15}$; $f \sim 10^{-8}$ Hz	$h \sim 10^{-30}$; $f \sim 10^2$ Hz
SMBH (= 10^6 масс SBH)	$h \sim 10^{-11}$; $f \sim 10^{-14}$ Hz	$h \sim 10^{-26}$; $f \sim 10^{-4}$ Hz

В своих оценках мы предполагали, что все черные дыры имеют одинаковую массу. Реальная популяция реликтовых черных дыр образуется из астрофизических черных дыр разной массы, которые накапливаются в повторяющихся циклах Вселенной (Горькавый и Тюльбашев, 2021). Наблюдаемая популяция дыр состоит в основном из SBH от 4 до $100 M_{\odot}$ (Горькавый и Тюльбашев, 2021; Abbot et al., 2020) и сверхмассивных ЧД с $\sim 10^5 - 10^{10} M_{\odot}$, расположенных в центрах

галактик (Черепашук, 2014). Предположим, что распределение по массам SBH, участвующих в слияниях во время Большого Сжатия, близко к современному распределению черных дыр. Следует учитывать, что в формулу (59) входит массовое распределение черных дыр $N(m)$. На рис. 9 в основном тексте показан спектр массы ЧД как функция частоты $h(f)$ в предположении, что сливающиеся черные дыры генерируют гравитационное излучение одной длины волны (с максимальной частотой и амплитудой).

Рис. 9 показывает, что зарегистрированные гравитационные волны расположены вблизи максимальной амплитуды гравитационных волн, которые следуют из нашей модели. Также из рис. 9 следует, что из-за влияния спектра масс черных дыр частотная зависимость амплитуды может значительно меняться. Для $f \sim (2.5 - 6.3) * 10^{-9}$ Гц (или 2.5-6.3 нГц) наша модель дает $h \propto f^{-(0.5-0.6)}$, что близко к наблюдению NANOGrav (см. рис. 9). Спектр гравитационного излучения малых ($4-20 M_{\odot}$) SBH зависит от наблюдательной селекции, поэтому трудно сделать какие-либо определенные выводы для $f > 6.3 * 10^{-9}$ Гц (или $f > 6.3$ нГц). Самым надежным наблюдательным фактом является отсутствие черных дыр массой менее $4 M_{\odot}$ и $f > 3.2 * 10^{-8}$ Гц (или $f > 32$ нГц), которые должны отражаться в спектре гравитационных волн. Барьер $f = \lg(3.2 * 10^{-8}) = -7.5$ (отмечен вертикальной линией) соответствует периоду гравитационных волн в один год.

Согласно наблюдениям, нет черных дыр, масса которых меньше чем $4 M_{\odot}$, или их очень мало (см. иллюстрацию 13). Это должно вызвать сильный дефицит GWB с частотами $f > 3.2 * 10^{-8}$ Гц (см. рис. 9). Действительно, нет «каких-либо обнаруживаемых вкладов от GWB» на частотах $f > 1.2 * 10^{-8}$ Гц (или 12 нГц) (Arzoumanian et al., 2020). Мы считаем этот факт очень важным. Дефицит (за пределами ожидаемых степенных зависимостей) GWB на частотах $f > 3.2 * 10^{-8}$ Гц (или $f > 32$ нГц) подтверждает нашу модель.

Стохастические гравитационные волны должны сопровождаться квадрупольной пространственной корреляцией согласно кривой Хеллингса – Даунса (Hellings & Downs, 1983). Как показывают результаты NANOGrav, фон стохастических гравитационных волн не имеет признаков монополярных и

дипольных волн. В то же время GWB имеет некоторые признаки квадрупольной пространственной корреляции, но с низким уровнем статистической достоверности (Arzoumanian et al., 2020).

В 2021 году была опубликована статья (Goncharov et al., 2021) с результатами анализа данных радиотелескопа Parkes Pulsar Timing Array (PPTA). Исходя из предположений анализа NANOGrav, команда PPTA с высокой степенью достоверности обнаружила по 26-ти миллисекундным пульсарам PPTA-DR2 коррелированный по времени сигнал с общим спектром во времени: $h \sim 2.2 * 10^{-15}$ на частоте 1 (1/год) (Goncharov et al., 2021). Данные PPTA также показали статистически слабые признаки квадрупольной пространственной корреляции, но для этой слабости существуют убедительные объяснения (Romano et al., 2021). Мы полагаем, что слабая квадрупольная корреляция, обнаруженная в обеих работах (рис. 7 Arzoumanian et al., 2020 и рис. 3 Goncharov et al., 2021), будет расти с увеличением количества используемых данных. Обсуждения вокруг GWB (Arzoumanian et al., 2020; Goncharov et al., 2021; Romano et al., 2021) показывают, что статистические методы, используемые при анализе сигналов пульсаров, содержат важные допущения, которые необходимо изучить, чтобы окончательно доказать обоснованность открытия GWB.

6. Формирование шаровых скоплений и галактик

Когда возраст расширяющейся Вселенной достиг 380 тысяч лет, протонно-электронная плазма охладилась до 3000 кельвинов и превратилась в нейтральный водород. В среде из водорода и темной материи возникла гравитационная неустойчивость Джинса (Зельдович и Новиков, 1975, Вайнберг, 1975), которая характеризуется следующим дисперсионным уравнением (Поляченко и Фридман, 1972, Горькавый и Фридман, 1994):

$$\omega^2 = k^2 c_s^2 - 4\pi G\rho \quad (63)$$

где ρ - объемная плотность среды; c_s - скорость звука; волновой вектор $k = 2\pi/\lambda$, где λ - длина волны возмущения; $\omega = 2\pi/T$ - частота колебаний с периодом T . Неустойчивость Джинса наступает при отрицательном квадрате частоты колебания (то есть при мнимых частотах колебаний):

$$k^2 c_s^2 - 4\pi G\rho < 0 \quad (64)$$

Это условие выполняется для возмущений плотности с длиной волны больше критической:

$$\lambda > c_s \sqrt{\frac{\pi}{G\rho}} \sim 100 \text{ световых лет} \quad (65)$$

где принята типичная оценка плотности гравитирующей материи $\rho \sim 3 * 10^{-21} \text{ г/см}^3$ и $c_s \sim 10^6 \text{ см/с}$ (Зельдович и Новиков, 1975, Вайнберг, 1975). Массу образующегося скопления можно оценить так (Зельдович и Новиков, 1975, Вайнберг, 1975; Peebles, 1993):

$$M_j \approx \rho \left(\frac{\lambda}{2}\right)^3 \sim 10^5 M_\odot \quad (66)$$

Характерное время развития джинсовской неустойчивости без учета расширения Вселенной:

$$T_j > \sqrt{\frac{\pi}{G\rho}} \sim 4 \text{ млн. лет} \quad (67)$$

Построим, следуя статье Gorkavui (2022b), простую аналитическую модель для аккреции облаков Джинса на сверхмассивную дыру (SMBH). Пусть SMBH движется сквозь среду, состоящую из облаков нейтрального водорода, с относительной скоростью V_{rel} . В зависимости от величины прицельного параметра p (расстояния между траекторией центра масс облака и черной дырой), угловой момент образующейся системы $\sim p M_j V_{rel}$ может быть большим или малым (для малых p). Во втором случае диск будет компактнее и плотнее.

Рассмотрим процесс взаимодействия газового облака с радиусом r и плотностью ρ с уже существующим вокруг сверхмассивной черной дыры затравочным диском с плотностью ρ_0 . Захват облаков Джинса в аккреционный диск зависит от направления движения налетающего облака: прямым мы будем называть облет облака, совпадающий с направлением вращения диска; обратным соударением будет называть встречу диска и облака, которое движется в направлении противоположном вращению аккреционного диска. Результат такого взаимодействия зависит от угла μ , под которым облако пересекает диск. Массу диска, участвующую во взаимодействии с облаком с массой m , которое пролетает диск под углом μ , можно оценить следующим образом:

$$m_0 = \rho_0 \frac{\pi hr^2}{\cos\mu} \quad (68)$$

Запишем закон сохранения импульса по осям Z и X, предполагая, что после взаимодействия весь начальный импульс газовых масс m и m_0 , столкнувшихся абсолютно неупруго, сохраняется в облаке с суммарной массой $m + m_0$:

$$mV\cos\mu = (m + m_0)V_{zs} \quad (69)$$

$$mV\sin\delta \pm m_0V_0 = (m + m_0)V_{xs} \quad (70)$$

Знак плюс соответствует движению диска в том же направлении, что и пролетающее облако, а знак минус – вращению диска в противоположном направлении. Для упрощения расчетов мы предполагаем, что взаимодействие между облаком на гиперболической траектории и круговым диском происходит только в точке минимального расстояния между облаком и SMBH. Для скорости облака в этой точке запишем следующее выражение:

$$V = \sqrt{\frac{\gamma GM}{R^2}} \quad (71)$$

где числовой параметр $\gamma > 2$ (величина 2 соответствует параболической скорости). Введем параметр β следующим образом

$$\frac{m}{m_0} = \frac{4\rho r}{3\rho_0 h} \cos\mu = \frac{4\rho r}{3\sigma} \cos\mu = \frac{\cos\mu}{\beta} \quad (72)$$

где β характеризует поверхностную плотность диска относительно плотности налетающего облака, умноженную на радиус облака:

$$\beta = \frac{3\sigma}{4\rho r} \quad (73)$$

Условие захвата облака, образовавшегося при соударении, запишем в виде неравенства, согласно которому итоговая скорость нового облака должна быть меньше параболической скорости:

$$V_{xs}^2 + V_{zs}^2 < \frac{2GM}{R^2} \quad (74)$$

Возведем (67) и (68) в квадрат и суммируем получившиеся выражения:

$$m^2V^2 \pm 2mm_0VV_0\cos\mu\sin\mu + m_0^2V_0^2 = (m + m_0)^2 (V_{xs}^2 + V_{zs}^2) \quad (75)$$

С учетом (74) и выражения (71), которое при $\gamma = 1$ дает формулу для круговой скорости V_0 , получим условие захвата вещества облака в аккреционный диск вокруг черной дыры:

$$\gamma m^2 \pm 2mm_0\sqrt{\gamma} \sin\mu + m_0^2 < 2(m + m_0)^2 \quad (76)$$

С учетом введенного параметра (71), выражение (74) перепишем в виде:

$$\gamma \cos^2\mu \pm 2\sqrt{\gamma} \beta \cos\mu \sin\mu + \beta^2 < 2(\cos\mu + \beta)^2 \quad (77)$$

Отсюда получим:

$$(\gamma - 2)\cos^2\mu \pm 2\sqrt{\gamma} \beta \cos\mu \sin\mu - 4\beta\cos\mu - \beta^2 < 0 \quad (78)$$

Условие захвата облака, который пересекает диск перпендикулярно к его плоскости ($\mu = 0$):

$$-\beta^2 - 4\beta - 2 + \gamma < 0 \quad (79)$$

Решением (79) будет неравенство:

$$\beta > \sqrt{\gamma + 2} - 2 \quad (80)$$

С учетом (73), получим условие аккреции (80) в виде:

$$\sigma > 4/3 (\sqrt{\gamma + 2} - 2)\rho_g r \quad (81)$$

Здесь учтено, что плотность ρ налетающего облака определяется двумя компонентами: плотностью газа ρ_g (~15%) и плотностью среды черных дыр (или другой темной материи) (~85%). При столкновении облака с диском, газ облака участвует в соударении и объединяется с газом диска, но компонента из черных дыр будет продолжать движение с некоторым замедлением из-за динамического трения. Таким образом, в выражении (81) должна стоять не полная плотность облака Джинса, а только плотность его газовой компоненты, то есть $\rho_g \approx 0.15\rho$. Темная часть шарового скопления может выйти на вытянутую эллиптическую орбиту и попасть в гало будущей галактики. Так как динамическое трение темной компоненты облака тоже вносит свой вклад в передачу импульса диску, то эффективный коэффициент будет больше 0.15. Из простых небесномеханических расчетов для гиперболических орбит облаков, касательных к точке соударения, можно получить следующее выражение:

$$\gamma = 2 + \left(\frac{V_h}{V_0}\right)^2 \quad (82)$$

Чем больше γ , тем сложнее выполняется условие захвата (80). Примем для максимальной оценки, что хаотическая асимптотическая (на бесконечности) скорость V_h облака примерно равна скорости кругового движения диска в точке

соударения, то есть $\gamma = 3$. Тогда $\sigma > 0.3\rho_g r$. Если $V_h \approx 0.5V_0$, то $\sigma > 0.08\rho_g r$.

Если вокруг SMBH возник диск достаточной плотности, то он будет перехватывать газовые облака, пролетающие под любыми углами к плоскости диска. В результате такой эффективной трехмерной аккреции, угловые моменты, который приносят захватываемые облака в диск, оказываются разнонаправленными и взаимоуничтожаются при усреднении и релаксации. Логично предположить, что в результате трехмерной аккреции получаются эллиптические галактики, которые обладают большой плотностью, а часто - и большой массой, но малым удельным угловым моментом.

Пусть $\gamma = 3$, и численным условием трехмерной аккреции будет неравенство:

$$\beta > 0.24 \text{ или } \sigma > 0.3\rho_g r \sim 0.01 \text{ г/см}^2 \quad (83)$$

где $r = 50$ световых лет, а $\rho_g \sim 0.15\rho \sim 10^{-21} \text{ г/см}^3$. Что происходит, если диск получил при образовании большой угловой момент, и оказался, например, в два раза менее плотным, что соответствует $\beta \sim 0.12$? Такой диск не может захватывать облака, которые пересекают его в перпендикулярном направлении. Как следует из уравнения (78), такой диск сможет захватывать лишь те облака, которые летят близко к плоскости диска и для которых $\mu > 80^\circ$ (в случае пролета облака в направлении вращения диска).

Если облако пролетает в противоположном направлении и сталкивается с большими скоростями с диском, то условие смягчается: будут захватываться облака даже с $\mu > 40^\circ$. Горькавый (2007) численно показал, что аккреционный диск эффективно захватывает даже массивные облака, которые огибают центральное тело в том же направлении, в каком вращается диск. Эти облака захватываются на орбиты с большой полуосью и приносят в периферийные области диска значительный угловой момент, отчего диск начинается расширяться и должен со временем сформировать дисковую компоненту спиральной галактики.

Облако, двигающееся в противоположном направлении, тормозится при дальнейшем взаимодействии с диском и выпадает в центральную часть дисковой галактики, где формируется балдж – область, аналогичная по строению и

вращению эллиптическим галактикам. Балдж может быть настолько плотным, что, как и эллиптические галактики, тоже способен захватывать облака, пролетающие через него в разных направлениях. Облако с ретроградных орбит может отнять (обнулить) угловой момент у части диска с примерно такой же массой. Таким образом, обратные захваты приводят к своеобразной аннигиляции момента у облака и соответствующей массы диска, в то время как прямые захваты могут приносить в диск облака с гораздо большей массой и моментом - см. численные расчеты Горькавого (2007). Кроме того, соударения на встречных курсах могут сопровождаться таким разогревом газа, участвующего в столкновении, что он может покинуть галактический диск.

Таким образом, внешние края галактики увеличивают свою массу и удельный угловой момент при захвате прямых облаков с большим моментом, в то время как в центрах галактик накапливается вещество с низким удельным угловым моментом, образующее балдж, похожий на эллиптические галактики. Следовательно, SMBH с плотным начальным аккреционным диском образуют эллиптические галактики, которые обладают малым угловым моментом, а SMBH с более разреженным затравочным диском формируют вокруг себя спиральные галактики в виде плоского диска с большим угловым моментом и с центральным балджем, похожим на эллиптические галактики. Можно предположить, что при прочих равных условиях (например, величине прицельного параметра), масса части газового облака m_{disk} , захваченной после его взаимодействия с черной дырой с массой M , зависит от площади сечения черной дыры, пропорциональной квадрату ее радиуса или массы: $m_{disk} \propto M^2$. Радиус R сферы тяготения черной дыры определяется из гравитационного ускорения на краю сферы $\frac{GM}{R^2}$ (см. (87) и обсуждение ниже), следовательно, радиус этой сферы $R \propto \sqrt{M}$. Отсюда получим, что поверхностная плотность первичного аккреционного диска вокруг черной дыры будет пропорциональна массе черной дыры:

$$\sigma = \frac{m_{disk}}{4\pi R^2} \approx kM \quad (84)$$

где k - коэффициент пропорциональности. Если поверхностная плотность первичного аккреционного диска вокруг черной дыры

будет пропорциональна массе черной дыры, то выражение (80) можно записать в виде:

$$M > (\sqrt{\gamma + 2} - 2) \frac{4\rho_g r}{3k} \quad (85)$$

Следовательно, эллиптические галактики должны иметь в центре более массивные черные дыры, чем дыры в центрах спиральных галактик. Также можно выдвинуть гипотезу, что яркие шаровые скопления образуются лишь из тех темных шаровых скоплений, которые имеют в своем составе достаточно крупную дыру (IMBH), которая обеспечила накопление газа и возникновение звезд в шаровом скоплении. Если же в темном скоплении были лишь дыры SBH, то оно так и остается скоплением-«призраком». Введем «фактор центральной черной дыры» (FBH) как отношение площади центральной дыры к суммарной площади остальных черных дыр:

$$FBH = \frac{r_{IMBH}^2}{r_{SBH}^2 N_{SBH}} \sim 1-100 \quad (86)$$

где отношение радиусов (или масс) IMBH и SBH взято как 10^{2-3} , а число дыр в скоплении $N_{SBH} = 10^4$. Из (86) следует, что центральная черная дыра, масса которой составляет всего несколько процентов от массы скопления, имеет площадь сечения, превосходящую суммарную площадь сечения многих тысяч остальных черных дыр. Если подсчитать FBH для галактик (заменяв IMBH на SMBH), то для Млечного Пути получим $FBH \sim 10$, а для Туманности Андромеды $FBH \sim 10^3$. Очевидно, что существование массивной черной дыры является важным условием для захвата окружающего газа и создания аккреционного диска. Количество SMBH совпадает с числом галактик, а вот количество IMBH гораздо меньше числа шаровых скоплений (Горькавый и Тюльбашев, 2021). Следовательно, звездно-газовой составляющей обладают практически все галактики, но лишь немногие шаровые скопления, поэтому подавляющая часть скоплений из черных дыр звездных масс остается темными и невидимыми.

В разделе 15.3 были кратко рассмотрены законы Талли-Фишера и Фабера-Джексона. Эти наблюдательные соотношения лучше всего выполняются для барионной массы галактик M_b , в то время как основная масса современных галактик содержится в виде массы темной материи M_{DM} в галактическом гало. Перепишем соотношение (8) из 15.3 в обобщенном виде для

суммы барионной массы и массы темной материи (Gorkavii, 2022b):

$$R(t)^2 = \frac{G[M_b(t)+M_{DM}(t)]}{f(t)} \quad (87)$$

Обобщенную формулу (5) из раздела 15.3 запишем в виде:

$$V^2 = \frac{G[M_b(t)+M_{DM}(t)]}{R(t)} \quad (88)$$

Из (87) и (88) получим

$$M_b(t)+M_{DM}(t) = \frac{V^4}{Gf(t)} \quad (89)$$

Если добавление темной материи в галактику растет вместе с ее барионной массой: $M_{DM}(t) = q(t)M_b(t)$, то будет выполняться обобщенный закон Талли-Фишера в виде:

$$M_b(t) = \frac{V^4}{Gf(t)[1+q(t)]} \quad (90)$$

Рассмотрим детальнее, следуя Gorkavii (2022b), М-сигма соотношение, установленное в работах Ferrarese & Merritt (2000), Gebhardt et al. (2000) – см. раздел 15.3 основного текста. В случае переменной плотности среды $\rho(t)$, для аккреционного роста галактики можно записать уравнение:

$$\frac{dM}{dt} = \rho(t)\pi R^2 V_{rel} \quad (91)$$

где плотность Вселенной $\rho(t)$ зависит от ее размера a :

$$\rho(t) = \rho_0 \left(\frac{a_0}{a}\right)^3 = \rho_0 \left(\frac{t_0}{t}\right)^\delta \quad (92)$$

Здесь ρ_0 и a_0 – плотность и радиус Вселенной эпоху рекомбинации t_0 .

С учетом (91), (92) и выражения (6) из основного текста, получаем:

$$\frac{dM}{dt} = \gamma \left(\frac{t_0}{t}\right)^\delta M \quad (93)$$

где

$$\gamma = \frac{\pi G \rho_0 V_{rel}}{f} \quad (94)$$

Уравнение (93) приводит к экспоненциальному закону роста галактики:

$$M = M_0 e^{\int \gamma \left(\frac{t_0}{t}\right)^\delta dt} \approx M_0 e^{\frac{\gamma}{\delta-1} t_0} \sim 10^{2-3} M_0 \quad (95)$$

где для оценок была приняты следующие значения: постоянная плотность аккрецирующей среды $\rho_0 \sim 3 * 10^{-21}$ г/см³; относительная скорость $V_{rel} \sim 300 - 400$ км/с; $f \sim 2 * 10^{-8}$ см/с² и t_0 равное 0.38 миллионов лет (и $t \gg t_0$). Если интерпретировать

M_0 в (95) как массу затравочной сверхмассивной черной дыры и учитывать зависимость Талли-Фишера (см. (7) из раздела 15.3), то из (95) получим М-сигма соотношение:

$$M_0 = S\sigma^4 \quad (96)$$

где

$$S = \frac{25}{Gf} e^{-\frac{\gamma}{\delta-1}t_0} \sim 2 * 10^{16} e^{-\frac{\gamma}{\delta-1}t_0} \text{ г(с/см)}^3 \quad (97)$$

Из наблюдений следует, что $S = 4 * 10^{12} \text{ г(с/см)}^3$ (Merritt 1999).

Это значение получится из (97), если $e^{-\frac{\gamma}{\delta-1}t_0} \sim 2 * 10^{-4}$. Отсюда и из (95) следует, что масса балджа достигнет значения $e^{\frac{\gamma}{\delta-1}t_0} \sim 5 * 10^3 M_0$ всего за несколько миллионов лет.

Следовательно, соотношение М-сигма можно считать прямым следствием и доказательством аккреционной теории образования галактик, которые прошли через период экспоненциального роста в течение $\sim 10^7$ лет после Большого взрыва.

Литература

С. Вайнберг, Гравитация и космология, Мир, М., 1975.

Н.Н. Горькавый, А.М. Фридман, Физика планетных колец. Небесная механика сплошной среды, Наука, М., 1994.

Н.Н. Горькавый, Изв. КрАО, 103 (2), 143, 2007.

Н.Н. Горькавый, А.С. Тюльбашев, Астрофизический бюллетень. т.76, N3, с.285-305, 2021.

А.Д. Долгов, УФН, 188, 121, 2018.

Я.Б. Зельдович, И.Д. Новиков, Строение и эволюция Вселенной, Наука, М., 1975.

Д. Крамер, Х. Штефани, М. Мак-Каллум, Э. Херльт. Точные решения уравнений Эйнштейна, Энергоиздат, М., 1982.

Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Теория поля, Наука, М., 1973.

В.Л. Поляченко, А.М. Фридман, Равновесие и устойчивость гравитирующих систем, Наука, М., 1976.

Г.К. Мак-Витти, Общая теория относительности и космология, ИЛ, М., 1961.

Ч. Мизнер, К. Торн, Дж. Уилер, Гравитация, т.2, Мир, М., 1977.

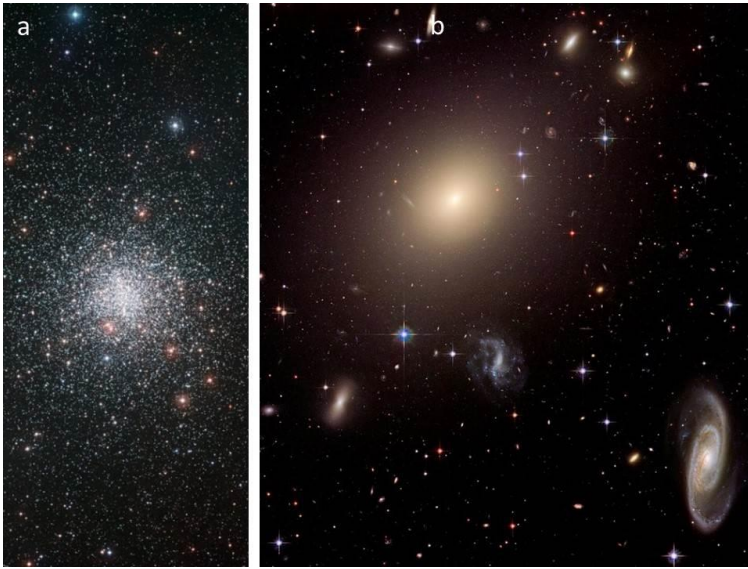
М. Сажин, Астрономический журнал, т.55, N1, с.65-68, 1978.

Дж. Силк, Большой взрыв. Рождение и эволюция Вселенной. Мир, М., 1982.

- О.К. Сильченко*, Происхождение и эволюция галактик, Век2, Фрязино, 2017.
- Дж. Синг*, Общая теория относительности, ИЛ, М., 1963.
- Р. Толмен*, Относительность, термодинамика и космология, Наука, М., 1974.
- И. Новиков, В. Фролов*, Физика черных дыр, Наука, М., 1986.
- А.М. Черепашук*, УФН, 184, 387, 2014.
- Э. Шредингер* (1956) Расширяющиеся Вселенные. Пространственно-временная структура Вселенной. М. Наука, ГИФМЛ, 1986
- А. Эйнштейн* (1919), Собрание сочинений, т.1, 1965, стр.664-671.
- А. Эйнштейн* (1953), Собрание сочинений, т.2, 1966, стр.762-799.
- А.С. Эддингтон*, Теория относительности, ОНТИ-ГТТИ, Л.-М., 1934.
- В.Р. Abbot, R. Abbot, T.D. Abbot et al.*, Phys.Rev.Lett., 116, 061102, 2016.
- P.A.R. Ade et al.*, A&A, 594, A13, 1, 2016.
- Ph. W. Anderson*, <https://arxiv.org/abs/1804.11186>, 2018.
- Z. Arzoumanian, P. Baker, H. Blumer et al.*, (The NANOGrav Coll.), Astrophys. J. Letters 905, L34, 2020.
- J.D. Bekenstein*, Phys.Rev.D, 7, 2333, 1973.
- К.М. Belotsky, V.I. Dokuchaev, Y.N. Eroshenko et al.* Eur.Phys.J., C79, 246, 2019.
- S. Bird, I. Cholis, J.B. Munoz et al.*, Phys.Rev.Lett., 116, 201301, 2016.
- L. Book, E. Flanagan*, Phys. Rev. D 83, 024024, 2011.
- W. Buchmuller, V. Domcke, K. Schmitz*, Phys. Lett. B 811, 135914, 2021.
- A. Burkert, D. Forbes*, Astron.J. 159, 56, 2020.
- B.J. Carr, A.A. Coley*, Int. Journ. Modern. Phys.D, 20, DSS14, 2011.
- S. Clesse, J. Garcia-Bellido*. Phys. Dark Universe 15, 142–147, 2017.
- T. Clifton, B.J.Carr, A.Coley*, Class.Quant.Grav., 34, 135005, 2017.
- S. Detweiler*, Astrophys. J. 234, 1100–1104, 1979.
- S. Dodelson*, Modern Cosmology, Academic Press, San Diego, 2003.
- G. Efstathiou*, MNRAS, 343, L95, 2003.
- C.A. Egan, C.H. Lineweaver*, ApJ, 710, 1825, 2010.
- L. Ferrarese, D.A. Merritt*, ApJ, 539, L9, 2000.
- P.H. Frampton, S.D.H. Hsu, D. Reeb et al*, Class.Quant.Grav., 26, 145005, 2009.

J. Garcia-Bellido & S. Clesse. <https://arxiv.org/abs/1710.04694>, 2017.
K. Gebhardt et al., *ApJ*, 539, L13, 2000.
B. Goncharov, R. Shannon, D. Reardon et al., *Astrophys. J. Lett.* 917, L19, 2021.
N. Gorkavyi, *Bull. American Astron. Soc.*, 35(3), 743, 2003.
N. Gorkavyi & A. Vasilkov, *MNRAS*, 461, 2929, 2016.
N. Gorkavyi & A. Vasilkov, *MNRAS*, 476, 1384, 2018.
N. Gorkavyi, A. Vasilkov, J. Mather, in *Exploring the Dark Side of the Universe*. Eds: B. Vachon and P. Petroff, *PoS(EDSU2018)039*, <https://pos.sissa.it/335/039/pdf>, 2018.
N. Gorkavyi, *New Astronomy*, 91: 101698, <https://doi.org/10.1016/j.newast.2021.101698>, 2022a.
N. Gorkavyi, *Galaxies*, 10: 73, <https://doi.org/10.3390/galaxies10030073>, 2022b.
V.G. Gurzadyan & R. Penrose, *The European Phys. Journal Plus*, 128, id.22, 2013.
C. Gwinn, T. Eubanks, T. Pyne et al., *Astrophys. J.* 485, 87–91, 2019.
W. Handley, *Phys.Rev.D*, 100, 123517, 2019.
S.W. Hawking, *Commun. math. Phys.*, 43, 199, 1975.
S.W. Hawking & R. Penrose, *Proc.Roy.Soc.Lond.*, 314, 529, 1970.
R. Hellings & G. Downs. *Astrophys. J. Lett.* 265, L39–L42, 1983
D. Hilbert, *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*. 24S, 53, 1917.
A. Jaffe & D. Baker, *Astrophys. J.* 283, 616–631, 2003.
A. Kashlinsky, *ApJ Lett.*, 823, L25, 2016.
K. Kohri & T. Terada, *Phys. Lett. B* 811, 136040, 2021.
S.M. Kopeikin, *Phys.Rev.D*, 86, 64004, 2012.
M. Kutschera, *MNRAS*, 345, L1, 2003.
V.D. Luca, G. Franciolini, A. Riotto, *Phys. Rev. Lett.* 126, 141303, 2021.
D. Merritt. In *Combes F., Mamon G. A., Charmandaris V. (eds.). Dynamics of Galaxies: from the Early Universe to the Present*. Vol. 197. *Astronomical Society of the Pacific*. pp. 221-232, 1999.
K. Migkas, G. Schellenberger, T.H. Reiprich et al, *A&A*, **636**, A15, 2020.
C. Moore, D. Mihaylov, A. Lasenby, G. Gilmore. *Phys. Rev. Lett.* 119, 261102, 2017.
K. Nguyen, T. Bogdanovic, J. Runnoe et al., *Astrophys. J. Lett.* 905, L34, 2020.

R.K. Patria, Nature, 240, 298, 1972.
P.J.E. Peebles, Principles of Physical Cosmology, Princeton Univ. Press., Princeton, 1993.
R. Penrose, The road to reality. A complete guide to the laws of the Universe, Alfred A. Knopf Publ., NY, 2005.
N.J. Poplawski, ApJ, 832, 96, 2016.
A.G. Riess, Nature, 2, 10, 2020.
J. Romano, J. Hazboun, X. Siemens et al., Phys. Rev. D 103, 063027, 2021.
W.M. Stuckey, Am.J.of Physics, 62, 788, 1994.
B. Temple & J. Smoller, PNAS, 106, 14213-14218, 2009.
E. Di Valentino, A. Melchiorri, J. Silk, Nature Astronomy, 4, 196, 2020.
Z.L. Wen, F.S. Liu, J.L. Han, Astrophys. J. 692, 511–521, 2009.



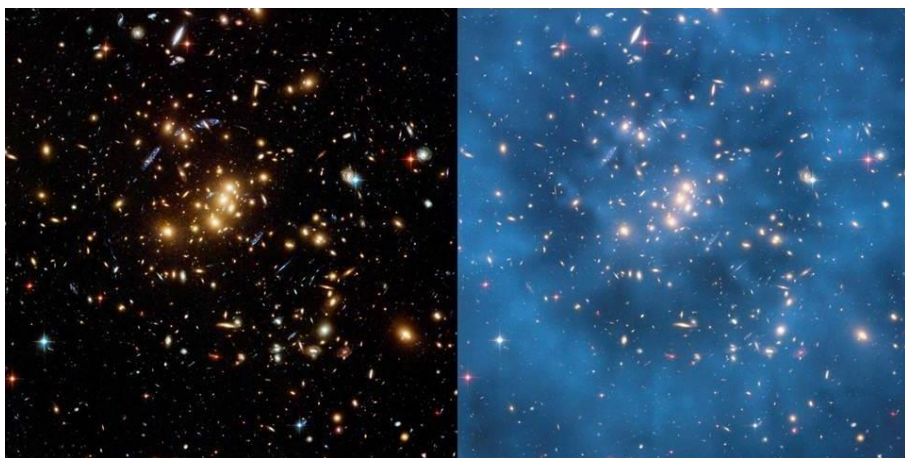
Илл. 1 (а). Шаровое скопление звезд М4 с радиусом в 35 световых лет, расположенное на расстоянии в 7200 св. лет (фото ESO); (б). Кластер галактик Abel S740 (NASA, ESA, STScI/AURA, J. Blakeslee). Эллиптическая галактика ESO 325-G004 (выше и левее центра) имеет размер больше 100 тысяч св. лет и расположена на расстоянии около 420 миллионов св. лет; в правом нижнем углу - спиральная галактика.



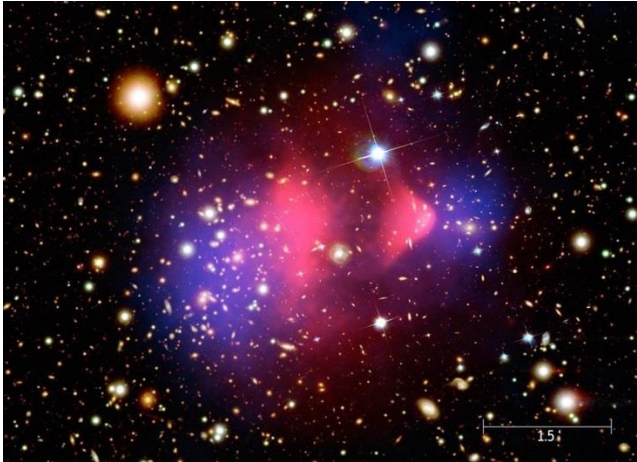
Илл. 2 Спиральная галактика Водоворот М51, похожая на наш Млечный путь, и ее галактика-компаньон NGC 5195. Водоворот, размером в 60-90 тысяч св. лет, удалены от нас на 20-40 миллионов св. лет (фото Hubble/NASA/ESA).



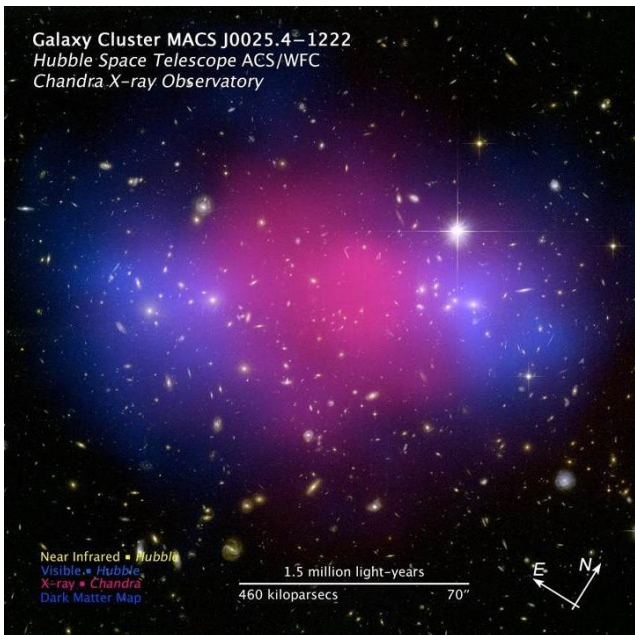
Илл. 3 Пример гравитационной линзы: гравитация красной галактики превратила изображение далекой голубой галактики в дугу (ESA/Hubble & NASA).



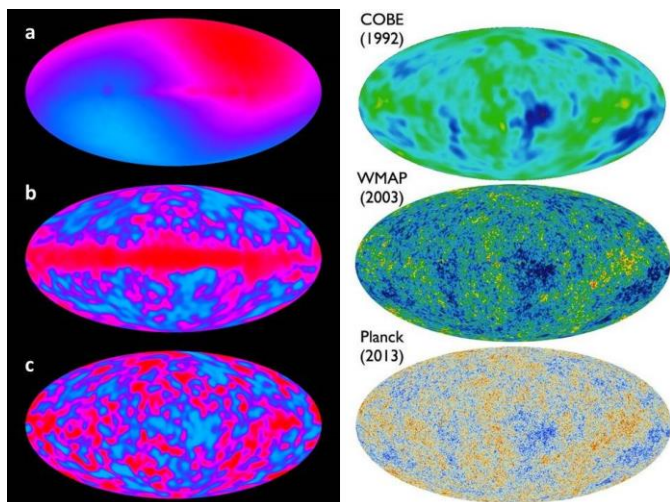
Илл. 4 Слева: скопление галактик CI 0024+17. Справа: распределение темной материи в данном скоплении, построенное методом гравитационного линзирования. NASA, ESA, M. J. Jee and H. Ford (JPL).



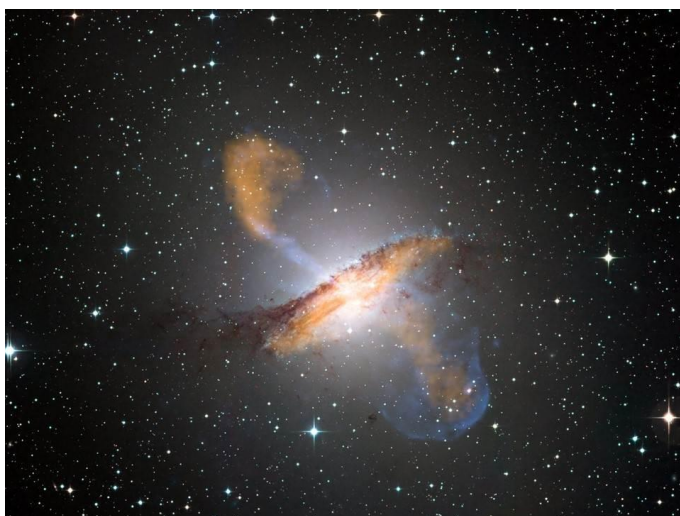
Илл. 5 Скопление галактик 1E 0657-56, известное как скопление Пуля, расположенное на расстоянии 3.7 млрд. св. лет (NASA/CXC/M. Weiss). На оптическое изображение наложено розовое рентгеновское свечение межгалактического газа, в котором содержится основная барионная масса скопления. Голубым указано распределение темной материи, построенное методом гравитационного линзирования.



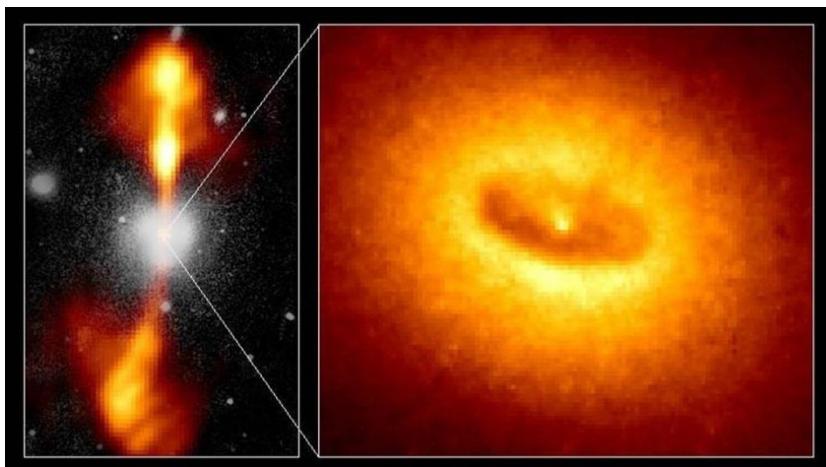
Илл. 6 Аналогичное изображение кластера галактик MACS J0025.4-1222 на расстоянии 6 млрд. св. лет, который возник при столкновении двух галактических скоплениях (NASA, ESA, CXC, M. Bradac and S. Allen). Отчетливо видно отделение барионной массы от темной материи.



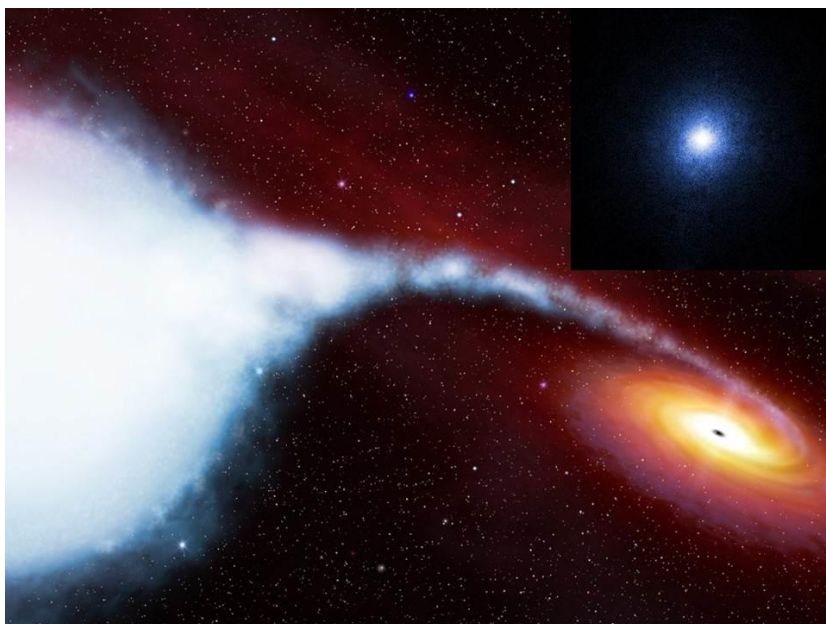
Илл. 7 Слева: карта реликтового излучения, полученная спутником COBE/DMR (NASA/GSFC/COBE). Сверху: дипольная компонента с амплитудой $\sim 10^{-3}$, вызванная движением Солнечной системы. В середине – излучение Галактики. Внизу: карта реликтового излучения с температурой 2.73K с флуктуациями $\sim 10^{-5}$, полученная после вычитания дипольной и галактической компонент. Справа: карты реликтового излучения из данных COBE (NASA/COBE/DMR), WMAP (NASA/WMAP Team), Planck (ESA/Planck Collaboration), имеющие, соответственно, угловое разрешение в 7° ; $0,3^\circ$; $0,07^\circ$.



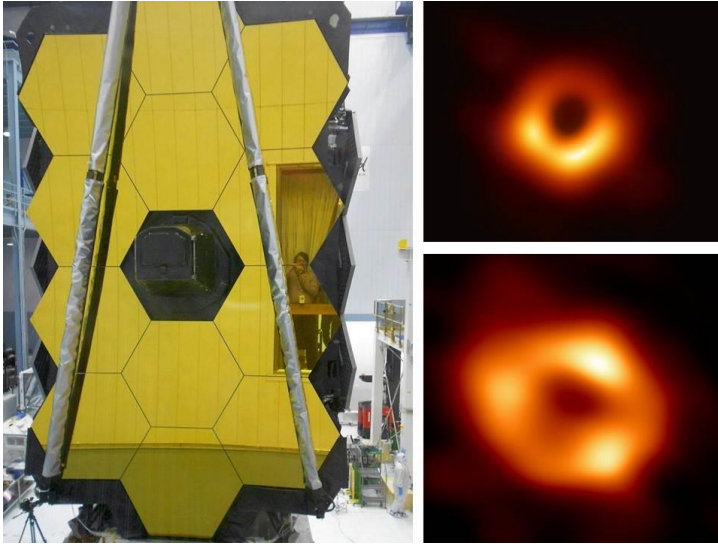
Илл. 8 Галактика Центавр А на расстоянии 10-16 млн. св.лет. В центре диска расположена черная дыра в 55 миллионов солнечных масс, выбрасывающая в противоположных направлениях два огромных джета (ESO/WFI (Optical); MPIfR/ESO/APEX/A.Weiss et al. (Submillimetre); NASA/CXC/CfA/R.Kraft et al. (X-ray)).



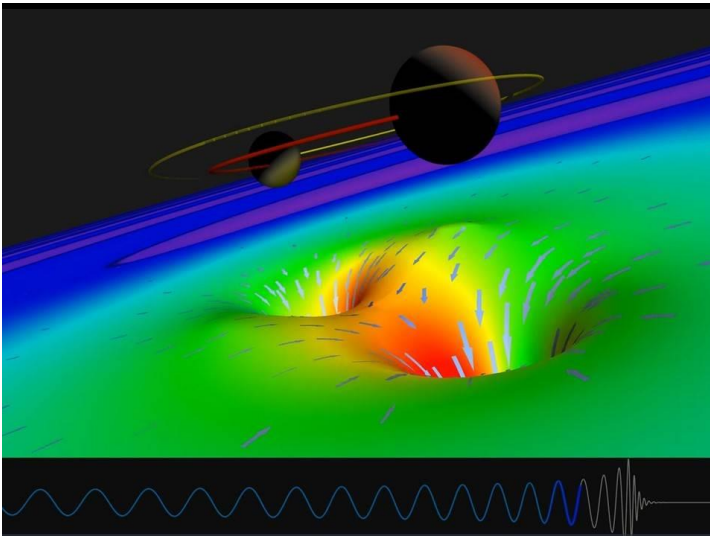
Илл. 9 Эллиптическая галактика NGC 4261, расположенная на расстоянии 100 млн. св.лет, в центре которой находится черная дыра с массой около 500 миллионов масс Солнца. Слева: джеты, выбрасываемые из центра галактики. Справа: пылевой диск вокруг черной дыры. Фото HST/NASA/ESA.



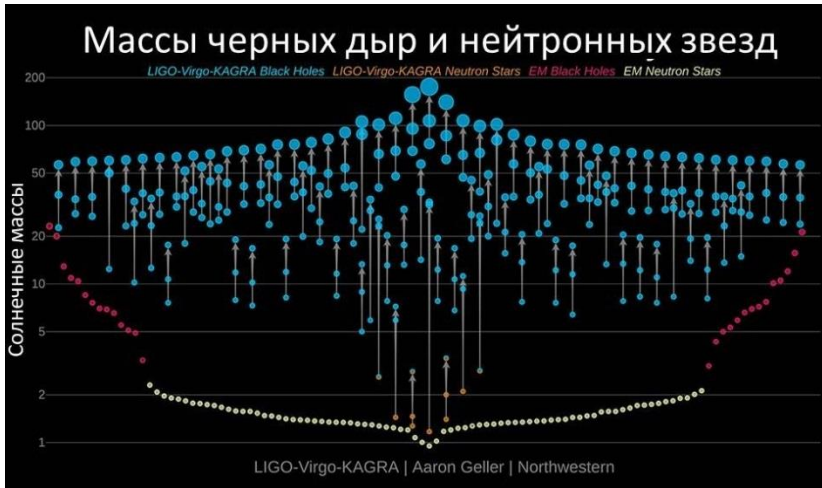
Илл. 10 Двойная система Лебедь X-1, изображенная художником (ESA/Hubble illustration). Система, расположенная на расстоянии 6 тысяч св.лет, представляет собой звезду (голубой сверхгигант), вещество которой перетекает к черной дыре с массой около 21 солнечной массы и образует вокруг нее аккреционный диск. На врезке: вещество, поглощаемое черной дырой в системе Лебедь X-1, ярко светится в рентгеновском диапазоне (NASA/CXC).



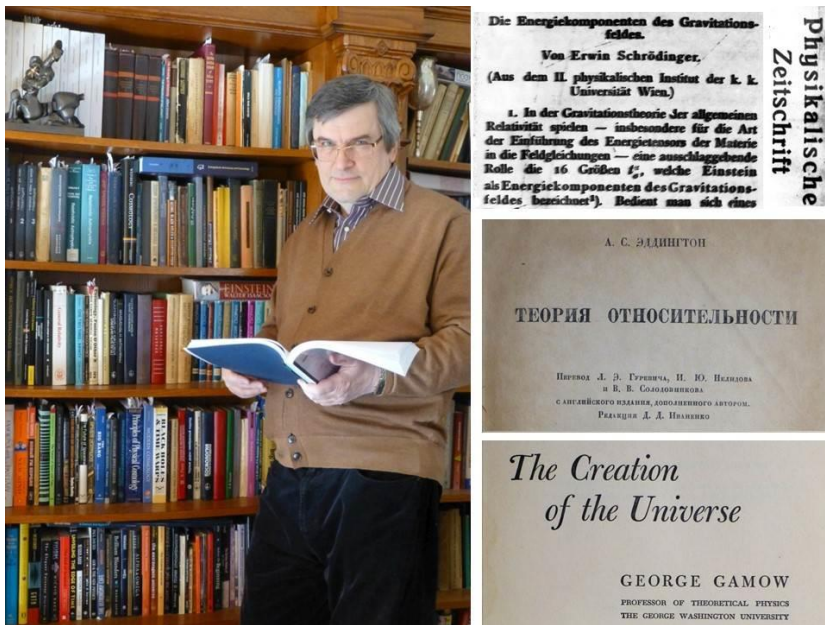
Илл. 11 Слева: золотой космический телескоп им. Вебба, собранный в Годдардском центре космических полетов (фото автора). Успехи наземной астрономии привели к получению первых изображений сверхмассивных черных дыр: массой в несколько миллиардов солнечных масс в центре галактики M87 (справа сверху); массой более 4 миллионов солнечных масс, в центре Млечного Пути (справа внизу) (ЕНТ Collaboration).



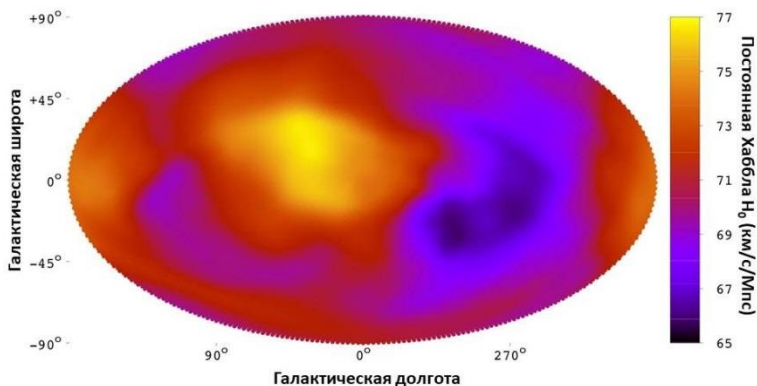
Илл.12 Гравитационные волны, вызванные слиянием черных дыр. Кадр из анимации показывает искривление пространства вокруг пары черных дыр за 0.04 секунды до их слияния. График внизу показывает амплитуду и частоту излучаемых гравитационных волн; синяя часть графика – уже излученные к настоящему моменту волны (Caltech-MIT-LIGO).



Илл. 13 Черные дыры (синие кружки) и нейтронные звезды (желтые кружки, с массой меньше 2.2 масс Солнца), открытые к ноябрю 2021 года по гравитационному излучению. Огибающая нижняя линия образована черными дырами (фиолетовые кружки) и нейтронными звездами (белые), открытыми оптическими телескопами (<https://media.ligo.northwestern.edu/gallery/mass-plot>).



Илл. 14 Слева: личная библиотека автора по гравитации и космологии в 250 томов. Справа: начало знаменитой работы Э. Шредингера 1918 года, где он показал нетензорность псевдотензора гравитационной энергии; монография Эддингтона (1934), который глубже всех понимал теорию Эйнштейна; книга Гамова (1953), который лучше всех постиг суть динамики Вселенной.



Илл.15 Анизотропия постоянной Хаббла. Рисунок из статьи Мигаса и др. (2020). Карта неба дана в галактических координатах (Млечный Путь расположен вдоль горизонтальной оси). Обратим внимание на темную область минимальной постоянной Хаббла в районе отрицательных галактических широт -20° и долгот $\sim 280^\circ$. Самая холодная часть этого пятна близка к Южному полюсу Земли, который имеет галактическую широту -27.1° и долготу 302.9° .



Илл.16 Слева: взаимодействующая пара галактик Антенны (NGC 4038 и NGC 4039) на расстоянии полусотни миллионов свет (NASA/ESA/Hubble telescope). Справа: пара дремлющих фламинго в зоопарке Гонолулу (фото автора). Существование галактик и живых существ оказалось возможным благодаря черным дырам и их энтропии.



А. Васильков и Н. Горькавый, 2017

