

М. Х. Шульман

***ПАРАДОКСЫ, ЛОГИКА И
ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ВРЕМЕНИ
(Последнее обновление: февраль 2020 г.)***

Москва 2006 - 2020

Шульман М.Х. ПАРАДОКСЫ, ЛОГИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ВРЕМЕНИ.

Рассмотрена модель Вселенной (близкая к модели Фридмана-Эйнштейна) в виде 3-мерной гиперповерхности шара в чисто евклидовом 4-мерном континууме. Дан анализ ограничений принципа эквивалентности Эйнштейна, найдено новое решение космологических уравнений. Время отождествляется с возрастающим радиусом Вселенной и всегда направлено по нормали к гиперповерхности шара. Физический смысл приписывается не частицам, а их мировым линиям, на этой основе и с учетом расширения Вселенной раскрывается суть феномена движения тел. Показана ограниченность принципа относительности, интерпретируется экспериментальный факт анизотропии реликтового излучения. Предсказания модели сравниваются с данными астрофизических наблюдений. Формулируется гипотеза, что масса частицы есть квантовое число - отношение размера Вселенной к длине волны де Бройля - которое растет со временем. Индивидуальные параметры волны де Бройля представляют собой, таким образом, “встроенные” часы и образец длины для каждого квантового объекта. В новой космологии модель “большого взрыва”, предполагающая сохранение массы и энергии Вселенной, заменяется на модель “энергетического насоса”. Предложен новый подход к описанию ускоренного движения. С новых позиций рассмотрены вопросы излучения и необратимости эволюции Вселенной.

M.H.Shulman. PARADOXES, LOGIC, AND PHYSICAL NATURE OF TIME

The new World concept close to Friedmann-Einstein's model considers the Universe as a 3D-hypersurface of some sphere in a purely Euclidean 4D-continuum. The analysis of Einstein equivalence principle limitations is made, the new solution of cosmological equations is found. Time is identified as increasing radius of the Universe and is always oriented normally to the sphere's hypersurface. Only particle world lines (not particles themselves) are considered to have a physical meaning, and by this way the phenomena of the bodies motion is deduced. The limitations of the relativity principle are shown, experimental fact of the “relic” radiation anisotropy is explained. The model's predictions are compared with the astrophysical observations data. We suppose also that the mass of a particle presents a quantum number being equal to the diameter of the Universe divided by de-Broglie's wave length and increasing with time. Thus, de-Broglie's wave individual parameters are the “built” clock and length sample for each quantum object. In the new cosmology the “big bang” concept and the mass and energy conservation principle are replaced by the “energy pump” concept. A new approach to describe an accelerated motion is proposed. The essential problems of the electromagnetic radiation and the irreversibility problem of the Universe evolution are considered.

Светлой памяти моей матери посвящаю.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Прежде всего автор хотел бы предупредить читателя, что на его суд выносится новая гипотеза о природе времени, которая пока еще не нашла признания в среде профессиональных физиков.

В мае 1997 года Информационно-рекламным центром РАО “Газпром” была выпущена моя брошюра “*О физической природе времени*”, которую автор затем несколько раз переиздавал самостоятельно, внося некоторые дополнения и исправления. В дальнейшем в издательстве “Едиториал УРСС” была выпущена книга [Шульман, 2003], а затем на сайте Института исследований природы времени (www.chronos.msu.ru) была опубликована продолжающая ее работа [Шульман, 2005]. Настоящая публикация представляет собой соединение вышеуказанных материалов в единое целое с учетом некоторых дополнений и изменений.

Первоначальная работа содержала результаты размышлений, вызванных чтением сборника статей Н.А.Козырева. Не приняв в целом предложенной им физической картины Мира, я, тем не менее, серьезно задумался о сущности времени, в частности – о несимметричной роли времени и пространства в процессе расширения Вселенной. Представленная работа не претендует на всеобъемлющий охват всей физической картины Мира; будучи посвященной значительно более узкой проблематике (характерной скорее для начала 20-го, а не 21-го века н. э.), она, однако, содержит весьма радикальную ревизию базовых физических принципов, что, в случае ее подтверждения, окажет несомненное влияние и на обобщающие теории.

Первая глава книги декларирует исходную естественно-научную позицию автора. *Вторая* глава посвящена роли и свойствам времени в теории относительности и имеет намеренно компилятивный характер, т.к., несмотря на все обилие учебной литературы по теории относительности, соответствующие результаты изложены в этой литературе, за редким исключением, недостаточно полно и ясно.

Начиная с *третьей* главы, автор переходит к изложению собственных концепций. В этой главе речь идет о космологии. В частности, в ней анализируется физический смысл принципа эквивалентности, выявляются новые стороны такого феномена, как гравитационный коллапс, и, самое главное, предлагается новое решение космологических уравнений. Здесь же выясняется эффективность этих решений с точки зрения современной космологии.

В *четвертой* главе на основе этого нового решения развивается модель шаровой расширяющейся Вселенной, в которой время, его течение и движение как таковое оказываются естественными конструкциями.

Пятая глава посвящена инерциальному движению и сравнению результатов предлагаемой теории с выводами теории относительности. Показано, что в первом приближении различий нет, однако в следующих приближениях новая концепция предсказывает существование абсолютной (выделенной) системы отсчета и объясняет реально существующие эффекты (например, дипольную анизотропию фонового излучения).

Неинерциальное движение и его связь с тяготением рассматриваются в *шестой* главе. Здесь для описания вариаций времени при неравномерном движении предлагается использовать не фиктивные гравитационные поля, а совершенно реальные изменения кинетической энергии, которые и являются физической причиной этих вариаций.

В *седьмой* главе производится анализ двух моделей излучения – традиционной и модели Уилера-Фейнмана. В этой второй модели, как известно, делается попытка дать симметризованное во времени решение волнового уравнения, включающее как запаздывающие, так и опережающие потенциалы. Я рассматриваю в рамках новых представлений обе модели,

однако в конечном счете прихожу к выводу, что в действительности применимость модели Уилера-Фейнмана связана не с “мгновенным” взаимодействием, а с типичным фазовым эффектом, когда один период “прямой” волны накладывается на другой, смещенный во времени, но согласованный по фазе период “обратной” волны.

Вопросы необратимости (в том числе, квантовой) достаточно подробно и в широком контексте рассматриваются в *восьмой* главе. Кроме того, я предлагаю новую термодинамическую концепцию эволюции Вселенной как своего рода тепловой машины, а также обобщение известного голографического предела для оценки энтропии произвольного объекта (в том числе – черных дыр).

Отмечу, что в 2007 - 2020 г.г. были внесены некоторые уточнения и дополнения.

Я горячо благодарен недавно скончавшемуся руководителю Российского междисциплинарного семинара по исследованию природы времени д.б.н. А. П. Левичу (МГУ) за проявленное им внимание и оказанную поддержку, в том числе за публикацию полученных мною результатов на сайте Института исследований природы времени (www.chronos.msu.ru, грант № 00-07-90211 Российского фонда фундаментальных исследований). Я также хотел бы выразить свою глубокую благодарность моему покойному другу А. В. Московскому за многолетнее обсуждение философии и истории физики. Указанные лица, разумеется, не несут никакой ответственности за недостатки данной работы.

Вопросы и замечания читатели могут присылать мне по электронному адресу shulman@dol.ru.

Автор, февраль 2020 г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
1. ВРЕМЯ И НАТУРАЛЬНАЯ ФИЛОСОФИЯ.....	7
2. ВРЕМЯ И ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ.....	10
2.1. Специальная теория относительности и преобразования Лоренца	10
2.2. Измерение пространственных и временных отрезков.....	11
2.3. Сопоставление лабораторной системы отсчета с движущейся.....	12
2.4. Хронологическая эволюция в специальной теории относительности	15
2.5. Парадоксы часов и близнецов в специальной теории относительности...	17
2.6. Парадокс близнецов и “радарное” время.....	20
2.7. Эксперименты с мюонами.....	21
2.8. Исходные представления общей теории относительности.....	22
2.9. Парадокс часов в общей теории относительности.....	24
2.10. Эксперименты по проверке общей теории относительности.....	26
2.11. Стационарная космологическая модель Эйнштейна	27
2.12. Нестационарная космологическая модель Эйнштейна-Фридмана (без космологической постоянной)	28
2.13. Стандартная космологическая модель (с ненулевой космологической постоянной)	29
3. О ЧЕРНЫХ ДЫРАХ, МЕТАБОЛИЧЕСКОМ ВРЕМЕНИ И ЛИНЕЙНОМ РАСШИРЕНИИ ВСЕЛЕННОЙ. НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.....	31
3.1. Историческое отступление.....	31
3.2. Статическое давление гравитирующей материи.....	33
3.3. Что происходит при коллапсе.....	36
3.4. О черных дырах и их “метаболическом” поведении.....	40
3.5. Свойства черных дыр: взгляд внешнего наблюдателя.....	41
3.6. Что происходит внутри черной дыры?.....	42
3.7. Новый подход для области внутри ЧД.....	43
3.8. Наша Вселенная в роли ЧД во внешней супер-вселенной.....	44
3.9. Формализм ТШРВ.....	45
3.10. Проблема космологической постоянной.....	49
3.11. О замкнутости Вселенной.....	49
3.12. Проблемы “горизонта” и “плоскостности” Вселенной.....	50
3.13. Начальный пик спектра мощности флуктуаций температуры космического фонового излучения.....	52
3.14. Проблема пониженной яркости вспышек Сверхновых.....	55
3.15. Зависимость углового размера галактик от красного смещения.....	57
3.16. Зависимость численности галактик от красного смещения.....	60
4. МОДЕЛЬ ШАРОВОЙ РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ВСЕЛЕННОЙ.....	66
4.1. Исходные представления о пространстве-времени в модели шаровой расширяющейся Вселенной.....	66
4.2. Закон Хаббла.....	68
4.3. Диаграммы причинности.....	69

5. ИНЕРЦИАЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ.....	71
5.1. Локальное приближение модели шаровой расширяющейся Вселенной...	71
5.2. Масса, энергия и импульс частиц.....	74
5.3. Относительность и абсолютность движения.....	77
5.4. О реальном существовании абсолютной системы отсчета.....	80
5.5. Абсолютная система отсчета и парадокс близнецов.....	83
6. ТЯГОТЕНИЕ И НЕИНЕРЦИАЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ.....	86
6.1. Почему тяготение приводит к неравномерности движения?.....	86
6.2. Нужно ли использовать фиктивные гравитационные поля?.....	87
6.3. Ускоренное движение и специальная теория относительности.....	89
6.4. Связь хода времени с величиной энергии.....	91
6.5. Ускоренное движение и ТШРВ.....	94
7. ВРЕМЯ, ПРОСТРАНСТВО И ИЗЛУЧЕНИЕ.....	94
7.1. Близкодействие и далекодействие.....	94
7.2. Обсуждение модели излучения Уилера-Фейнмана	95
7.3. Излучение и теория шаровой расширяющейся Вселенной.....	97
8. О НЕОБРАТИМОСТИ.....	99
8.1. Общий анализ проблемы.....	99
8.2. Связь второго начала термодинамики с диссипацией энергии.....	100
8.3. Возможный механизм появления необратимости при диссипации энергии.....	101
8.4. Необратимость и космология.....	102
8.5. Энтропия и гравитация.....	104
8.6. Необратимость и электромагнитное излучение.....	106
8.7. Специфика необратимости в квантовой теории.....	108
8.8. С.Хокинг о психологической стреле времени.....	111
9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	112
БИБЛИОГРАФИЯ.....	116

1. ВРЕМЯ И НАТУРАЛЬНАЯ ФИЛОСОФИЯ

Природа времени до сих пор остается недостаточно ясной для естествознания и натурфилософии, хотя представление о нем интенсивно используется в научной и практической деятельности человечества. В механике Ньютона время выступало в качестве некоего универсального формального параметра, значение которого мистически неуклонно (и притом одинаково для всех точек Вселенной) возрастает, а все физические процессы происходят в пространстве в соответствии с течением времени. В специальной теории относительности противопоставление времени пространству в значительной мере снято благодаря их объединению в 4-мерный континуум, однако и там временная компонента имеет несколько "экзотический" характер, что проявляется в необходимости приписать ей мнимый множитель; и в этой модели априорно подразумевается рост времени в любой системе отсчета. Общая теория относительности позволила связать свойства времени с полями тяготения и геометрией пространства, однако не прояснила для нашей интуиции смысл этого параметра, а может быть и сделала его еще более таинственным; наряду с этим подразумеваемое течение времени стало связываться с пространственным расширением Вселенной.

Размышляя о сущности времени, мы можем говорить по меньшей мере о трех его аспектах. Во-первых, как об одном из реально существующих измерений (наряду с тремя пространственными). Объективная протяженность времени проявляется в существовании у каждой физической системы характерных параметров, своего рода временных размеров, в известной степени аналогичных пространственным размерам. Эта аналогия, в частности, обусловлена тем, что и собственные размеры системы, и ее временные характеристики (инерционность) обусловлены взаимодействием составляющих систему элементов. Стабильность подобных связей, в свою очередь, позволяет измерять и пространственную, и временную протяженность путем сравнения, соответственно, с реальным эталоном физического размера или периодом колебаний.

Выше уже была отмечена метрическая особенность данного измерения, вынуждающая приписать ему мнимый множитель. Этот множитель, с одной стороны, вводит радикальное различие между временной и пространственными компонентами, характеризуя в том числе и нашу неспособность непосредственно воспринимать время, в отличие от пространства, с помощью органов чувств. С другой стороны, это различие чисто метрического порядка, и оно позволяет уже в рамках теории специальной относительности говорить всего лишь о различных проекциях единого объекта - четырехмерного вектора. Мнимость временной компоненты является источником многих привлекающих внимание идей: например, С.Хокинг [Хокинг, 1990] использует ее для устранения сингулярностей из теории эволюции Вселенной; И. Пригожин [Пригожин, Стенгерс, 1994] с ее помощью исследует возможность обобщения аппарата квантовой механики для объяснения необратимости поведения волнового пакета.

Во-вторых, времени присуще определенное направление - так называемая стрела времени. Точнее, говорят о нескольких стрелах времени - космологической, термодинамической и т.д., и о примечательной связи между ними, для объяснения которой выдвигаются различные теоретические обоснования (заметим, что у пространственных измерений физического континуума современная физика и натурфилософия подобных свойств не усматривают). И если одни авторы пытаются тем или иным образом "вывести" направленность времени из определенных более общих свойств Мира, то другие (И.Пригожин) категорически настаивают на априорности этого факта, его первичности по отношению к установленным законам природы.

В третьих, Н.А.Козыреву [Козырев, 1991] принадлежит формулировка представления о ходе времени как первооснове всего бытия нашего Мира. Можно принимать или отвергать его соображения об интенсивности и неравномерности этого *хода*, представления о времени как о некоей *субстанции*, его конкретные теоретические модели и результаты экспериментов, но любому человеку интуитивно очевиден (не непосредственно через органы чувств, но

опосредованно через опыт бытия) сам факт *течения* времени как основы любого природного или искусственного процесса. Действительно, когда мы рассматриваем некоторый протяженный объект в абстрактном пространстве, нам нет необходимости специально вводить новое измерение, а вполне достаточно в качестве параметра использовать комбинацию существующих (как, например, при дифференцировании по длине дуги). В этом случае параметр характеризовал бы положение (состояние) наблюдателя, а не наблюдаемого объекта. Мы же связываем процесс с реальным изменением состояния самого объекта; время для нашей интуиции выступает в качестве реального, а не виртуального фактора.

Традиционный подход теоретической физики к описанию процессов основан на использовании представления о ходе времени в качестве первичного, исходного. В современной физике делаются также попытки прийти к понятию времени как ко вторичному, дедуцируемому или конструируемому на базе некоторых иных (микроскопических) фундаментальных понятий. Возможен и третий путь (инверсный по отношению к первому), который лежит в основе представленной работы. Этот путь в качестве отправной точки содержит следующий вопрос: “А не существует ли во Вселенной процесса, имеющего исключительно общий характер, который мог бы *породить* физическое время?”

Такой фундаментальный космологический процесс в действительности существует. Более того, он хорошо известен науке. Это - расширение Вселенной, открытое в первой трети XX века американским астрономом Э.Хабблом и другими (см., например, [Шаров, Новиков, 1989]). Под ним понимается не удаление тел от общего центра, а “всеобщее” увеличение расстояний между всеми телами. Хорошим модельным образом является “разбегание” точек на поверхности воздушного шара при его заполнении газом, при этом его центр не принадлежит поверхности, а все точки поверхности шара (Вселенной) равноправны.

Наблюдая так называемое “красное смещение” в спектрах звезд, Хаббл экспериментально установил пропорциональность между средней скоростью взаимного удаления звездных объектов и расстоянием между ними. А английский астрофизик Э.А.Милн теоретически вывел этот закон из сформулированного им Космологического принципа. В соответствии с данным принципом “следует ожидать, что в любой данный момент времени Вселенная должна выглядеть одинаково для наблюдателей на всех типичных галактиках, в каком бы направлении они ни смотрели” [Вайнберг, 2000]. Отсюда, в частности, следует, что если наблюдатели в точках **A**, **B** и **C** расположены на одной прямой, и расстояние **AC** вдвое больше расстояния **AB**, то для наблюдателя **A** скорость наблюдателя **B** должна быть такой же, как и скорость наблюдателя **C** для наблюдателя **B**; следовательно, для наблюдателя **A** скорость **C** должна быть вдвое больше, чем скорость **B**, и т.д.

Чуть раньше, чем экспериментальные наблюдения, к тем же представлениям привела и теоретическая физика. Как известно, в 1905 году появилась специальная теория относительности, а к 1916 году - общая теория относительности Эйнштейна, после чего (начиная с работы А.А.Фридмана [Фридман, 1922]), была развита модель расширяющейся Вселенной. Содержание этих идей и их обобщение излагается в следующей главе, а здесь я вкратце упомяну еще о некоторых важнейших концептуальных моментах современной физики, с которыми тесно связано дальнейшее содержание книги, и к которым я собираюсь привлечь внимание читателя.

Во-первых, я намерен критически обсудить принцип относительности, т.е. инвариантность законов физики по отношению к выбору инерциальной системы координат.

Кроме того, речь пойдет о законе сохранения энергии, роль которого объяснять излишне. Его теоретическое обоснование в классической физике базируется на концепции однородности времени, поэтому вполне естественно, что этот закон должен оказаться в фокусе любой новой теории, касающейся понятия времени.

Далее, хотелось бы остановиться на таком всем “понятном” феномене, как механическое движение. Я постараюсь показать, что вместо бесчисленного множества независимых перемещений физика может (и должна) оперировать лишь с одним общемировым процессом. Из лежащих в основе этого представлений вытекает не только естественное ограничение

скорости движения некоторой максимальной величиной, но и огромное количество других физических следствий.

Развиваемую ниже концепцию я предлагаю именовать Теорией Шаровой Расширяющейся Вселенной, кратко – ТШРВ.

2. ВРЕМЯ И ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

2.1. Специальная теория относительности и преобразования Лоренца

Специальная теория относительности (СТО) в самом начале 20-го века постулировала основанный на опыте принцип: *скорость света одинакова в любых системах отсчета, даже если какая-либо из этих систем движется относительно другой такой системы.*

Из этого утверждения вытекает, что временные и пространственные промежутки в различных системах отсчета в общем случае не одинаковы, однако равенство $c = \Delta r / \Delta t$ (где c – скорость света, Δr – промежуток пути, пройденный светом за время Δt) справедливо в любой системе отсчета.

Приведенная формулировка принципа относительности противоречит представлениям классической физики, но еще *не фиксирует однозначным образом* нового (релятивистского) закона преобразования пространственных и временных промежутков при переходе от одной системы отсчета к другой.

В концепции Ньютона-Галилея время текло во всех системах одинаково, а преобразование системы отсчета сводилось к параллельному переносу и повороту 3-мерной системы координат. При трехмерном повороте инвариантной (неизменной) остается сумма квадратов трех пространственных проекций отрезка. Эйнштейн и Минковский предложили теоретическую модель, в которой пространство и время образуют 4-мерное пространство с псевдоевклидовой метрикой, а переход от одной системы отсчета к другой равносителен повороту 4-мерной системы координат, сохраняющему инвариантным квадрат 4-мерного интервала $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2$. Разумеется, из этого в качестве частного случая следует условие $c = \Delta r / \Delta t$ для распространения света.

Хотя идея поворота является общей для 3-мерного евклидова пространства Ньютона-Галилея и 4-мерного псевдоевклидова пространства Эйнштейна-Минковского, к этой аналогии следует подходить осторожно, когда речь идет о повороте в пространственно-временных плоскостях, где ось времени является мнимой. В этом случае зрительная интуиция часто вводит в заблуждение.

Переход от одной движущейся инерциальной системы отсчета к другой путем поворота в пространственно-временной плоскости $\{x, it\}$ с мнимой осью времени it определяется [Ландау и Лифшиц, 1967] формулами

$$x = x' \operatorname{ch} \theta + ct' \operatorname{sh} \theta, \quad ct = x' \operatorname{sh} \theta + ct' \operatorname{ch} \theta$$

где $\{x, t\}$ – координаты в “старой” системе отсчета (т.е. до поворота), $\{x', t'\}$ – координаты в “новой” системе отсчета (т.е. после поворота). Это – линейное преобразование, коэффициенты которого выражаются через мнимый угол поворота θ . В свою очередь, в данном случае угол поворота θ определяется отношением взаимной (равной по определению) скорости движения обеих систем отсчета к скорости света:

$$\operatorname{th} \theta = x/ct = v/c$$

В дальнейшем отношение v/c будем обозначать символом β , т.е. положим $\beta = v/c$, тогда получим:

$$\operatorname{sh} \theta = \beta / \sqrt{1 - \beta^2}, \quad \operatorname{ch} \theta = 1 / \sqrt{1 - \beta^2}$$

Теперь формулы преобразования можно записать в виде:

$$x = (x' + vt') / \sqrt{1 - \beta^2}, \quad t = (x'v/c^2 + t') / \sqrt{1 - \beta^2}$$

2.2. Измерение пространственных и временных отрезков

Вся кинематика основана на измерении пространственных и временных отрезков. Пространственные размеры определяются с помощью *линейки*, их измерение сводится к нахождению *отношения* длины пространственного отрезка к длине *эталонной* линейки. Аналогичным образом измерение времени сводится к нахождению *отношения* длительности промежутка времени к длительности эталона времени. Для этого используется тот или иной вид *часов*.

Существует важное инструментальное отличие часов от линейки. Чтобы измерять длину, нам достаточно иметь лишь *один экземпляр* линейки, т.к. подразумевается, что мы можем свободно перемещать линейку в пространстве. Напротив, перемещаясь в универсальном потоке времени, мы измеряем длительность процесса, используя *последовательность* эталонных временных промежутков, которые, как мы полагаем, строго совпадают между собой. Мы не можем использовать единственную реализацию эталона времени, т.к. не можем перемещаться во времени сами либо перемещать во времени другие тела или процессы. Часы – это как раз такой инструмент, который генерирует *периодические процессы* во времени - маркеры равных временных промежутков, используемых для сравнения с длительностью текущей фазы измеряемого процесса. При этом *непосредственно убедиться в равенстве* длительностей различных периодов колебаний мы не можем, возможно использование лишь косвенных аргументов (например, совпадение показаний многих часов различной природы).

Что же происходит, согласно СТО, при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой, *движущейся* относительно первой и жестко связанного с ней наблюдателя?

Пусть в неподвижной системе покоится стержень, параллельный оси x , причем его концы в этой системе имеют координаты x_1 и x_2 . Тогда длина стержня в этой системе будет равна $\Delta x = x_2 - x_1$. Используя формулу связи между старыми и новыми координатами

$$x = (x' + vt') / \sqrt{1 - \beta^2}$$

найдем (в *один и тот же* момент времени t') :

$$x_1 = (x_1' + vt') / \sqrt{1 - \beta^2}, \quad x_2 = (x_2' + vt') / \sqrt{1 - \beta^2}$$

так что

$$\Delta x = x_2 - x_1 = [(x_1' + vt') - (x_2' + vt')] / \sqrt{1 - \beta^2} = \Delta x' / \sqrt{1 - \beta^2}.$$

или

$$\Delta x' = \Delta x \sqrt{1 - \beta^2}.$$

Таким образом, длина стержня $\Delta x'$ в движущейся относительно него системе отсчета умножается на множитель (радикал), величина которого в общем случае меньше единицы. Иными словами, измерение длины стержня в *один и тот же* момент времени даст *наибольший* результат (*собственную* длину) в той системе отсчета, относительно которой стержень покоится.

Пусть, далее, в неподвижной системе отсчета имеются двое часов. Часы 1 неподвижны, тогда как часы 2 *движутся*. Пусть происходят два события в моменты времени t_1 и t_2 , отсчитанные по *неподвижным* часам. Используя формулу связи между старыми и новыми значениями времени

$$t = (x'v/c^2 + t') / \sqrt{1 - \beta^2}$$

будем искать выражение для интервала времени в системе отсчета, жестко связанной с движущимися часами 2 (т.е. в такой, где эти часы 2 покоятся в одной и той же точке x'). Имеем:

$$t_1 = (x'v/c^2 + t'_1) / \sqrt{1 - \beta^2}, \quad t_2 = (x'v/c^2 + t'_2) / \sqrt{1 - \beta^2}$$

так что

$$\Delta t = t_2 - t_1 = [(x'v/c^2 + t'_2) - (x'v/c^2 + t'_1)] / \sqrt{1 - \beta^2}$$

или, в конечном счете

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \beta^2}.$$

Таким образом, *движущиеся относительно часов 1 (и жестко связанного с ними наблюдателя) часы 2 в общем случае показывают время ($\Delta t'$) меньшее, чем часы 1 (Δt)*. Если скорость движущихся часов 2 стремится к скорости света, то показываемый ими промежуток времени стремится к нулю.

Примечание: С другой стороны, для этих движущихся часов 2, которые из пространственной точки А перемещаются в другую пространственную точку В, *всякие движущиеся равномерно относительно них часы можно рассматривать в качестве вышеупомянутых часов 1, и всегда часы 2 покажут время меньшее, чем часы 1*. Иными словами, время, отсчитываемое по часам, равномерно движущимся *вместе с данным объектом из одной заданной пространственной точки в другую заданную точку* (собственное время данного объекта), является *наименьшим*. Неверно было бы смешивать данную ситуацию с парадоксом близнецов (о котором речь впереди), когда несколько по-разному движущихся часов попадают из одной *пространственно-временной* точки в другую *пространственно-временную* точку – в этом случае наибольшее время покажут *равномерно* движущиеся часы, тогда как все прочие будут вынуждены (чтобы вовремя оказаться в конечной точке пространства-времени) двигаться *неравномерно*!

В результате мы приходим к следующему важному выводу. Если в быстро движущейся ракете имеются два устройства – часы и линейка для измерения пройденного расстояния, то и эти часы, и эта линейка *при движении* (например, от одной планеты к другой) покажут и время, и расстояние в γ раз меньшие, чем соответствующие время и расстояние, измеренные *неподвижным* наблюдателем одной из планет. При этом величина γ равна

$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - \beta^2},$$

а скорость v движения ракеты относительно планеты или планеты относительно ракеты (т.е. взаимная скорость) оказывается, как и должно быть, *одинаковой*:

$$v = \Delta x / \Delta t = \Delta x' / \Delta t'$$

2.3. Сопоставление лабораторной системы отсчета с движущейся

В физике (условно) неподвижную систему отсчета, связанную с наблюдателем, принято называть *лабораторной*. Чтобы выявить и проанализировать характерные эффекты, возникающие в специальной теории относительности, оказывается очень полезным строить для одного и того же множества точек (пространственно-временных событий) две системы

координат – лабораторную и движущуюся (назовем ее системой отсчета *ракеты*). Взаимное соответствие между ними оказывается существенно иным, нежели в случае двух евклидовых систем координат (что, к сожалению, крайне неполно отражено в подавляющем большинстве учебников по теории относительности). При этом мы для простоты ограничимся лишь одним пространственным измерением по оси x .

Что касается оси времени, то опять-таки для простоты выберем систему единиц, в которой скорость света c принята равной 1, поэтому в численном отношении величины t и ct считаются равными. Следует также помнить, что ось времени является мнимой, так же как и пространственно-временные углы.

Теперь начнем наши построения, максимально следуя схеме, приведенной в замечательной учебной монографии [Тэйлор и Уилер, 1971]. Прежде всего построим две *ортогональные* оси x и t лабораторной системы отсчета. Далее построим ось времени t' системы отсчета ракеты. Эта ось будет изображаться прямой линией, проходящей через начало лабораторной системы под (мнимым) углом θ , где

$$\operatorname{sh} \theta = \beta / \sqrt{1 - \beta^2}, \quad \operatorname{ch} \theta = 1 / \sqrt{1 - \beta^2}$$

Это — геометрическое место всех событий, происходящих в начале пространственных координат системы отсчета ракеты, т.е. это действительно ось t' *системы отсчета ракеты*. Наклон оси t' по отношению к оси t определяется соотношением:

$$\text{Пройденный путь/Время движения} = \beta = \operatorname{th} \theta$$

Если скорость ракеты (т.е. тангенс угла между осями t и t') мала, то и угол θ невелик. Если же скорость ракеты близка к скорости света, то и угол θ стремится к половине прямого угла.

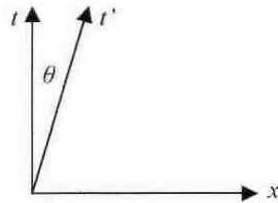


Рис. 2.1. Положение в лабораторной системе отсчета оси времени системы отсчета ракеты.

Теперь мы должны построить пространственную ось x' , отвечающую системе отсчета ракеты. В силу линейности преобразования Лоренца, это также будет прямая линия. На основании принципа относительности ось x' системы отсчета ракеты должна *подниматься вправо* с тем же наклоном, с каким ось t' системы отсчета ракеты *отклоняется вправо* же (т.е. *мировая линия света в любой системе должна оставаться биссектрисой*). На рис. 2.2 пунктиром проведена мировая линия вспышки света, а также показана координатная сетка системы отсчета ракеты так, как она будет выглядеть в лабораторной системе. Таким образом, в лабораторной системе отсчета система координатных осей ракеты будет уже не ортогональной, а *косоугольной*!

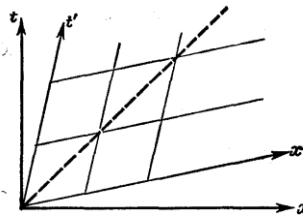


Рис. 2.2. Положение в лабораторной системе отсчета пространственной оси системы отсчета ракеты.

Нам осталось сделать последний шаг – установить, как одновременно с изменением угла меняется *шаг координатной сетки*, т.е. шкала длин и времен. Действительно, эта шкала вовсе не остается одной и той же!

Проведем гиперболу $t^2 - x^2 = 1$, полагая скорость света с равной единице (рис. 2.3). В той точке, где эта гипербола пересекает ось t лабораторной системы отсчета (где $x = 0$), мы имеем момент времени $t = 1$. Однако интервал $t^2 - x^2$ инвариантен, так что при этом мы получим также $(t')^2 - (x')^2 = 1$. Следовательно, в точке пересечения гиперболой оси t' системы отсчета ракеты (где $x' = 0$) мы имеем момент времени $t' = 1$. Из соображений симметрии и ввиду линейности уравнений преобразования отрезок оси t' от точки $t' = 0$ до точки $t' = 1$ можно использовать в качестве единицы масштаба, откладываемого *как* вдоль оси t' , *так* и вдоль оси x' . Таким образом, по мере увеличения угла шкала длин и времен растягивается (или, что равнозначно, сами пространственные и временные отрезки как бы сжимаются)!

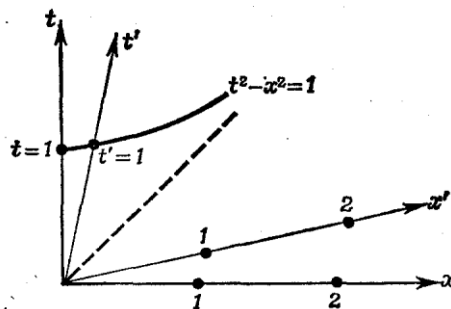


Рис. 2.3. Градуирование пространственной и временной осей системы отсчета ракеты.

Сказанное соответствует следующему. При градуировке осей на рис. 2.3 была изображена лишь одна инвариантная кривая вида $t^2 - x^2 = a^2$ для $a = 1$. Если мы построим такие же кривые для $a = 2, 3$ и т.д., то на рис. 2.3 ось t' они пересекут соответственно в точках 2, 3 и т.д., причем расстояния между точками пересечения кривой по этой оси будут равны между собой и в одинаковое число раз больше расстояний между точками пересечения этой же кривой с осью t .

Продолжая оси времени t и t' вниз, а пространственные оси x и x' влево, мы завершим построение, учитывая теперь прошлое движение и движение в отрицательном направлении.

Если два события одновременны в лабораторной системе отсчета, они будут лежать на прямой, параллельной оси x лабораторной системы на диаграмме пространства-времени (рис. 2.4). Если два события одновременны в системе отсчета ракеты, они будут лежать на прямой, параллельной оси x' системы ракеты на диаграмме пространства-времени. Поэтому два наблюдателя не обязательно считают одновременными одни и те же пары событий. Это и есть *относительная синхронизация часов*.

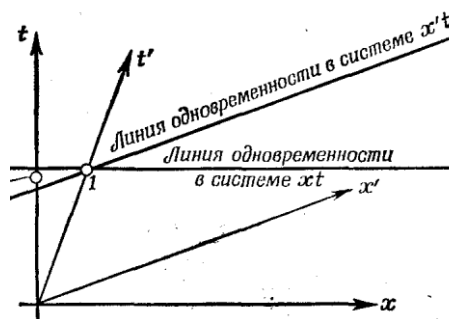


Рис. 2.4. Эффект замедления хода времени.

Используя линии одновременности на рис. 2.4, мы можем видеть, что для наблюдателя в системе отсчета ракеты часы, расположенные в начале лабораторной системы пространственных координат, еще не показывают 1 ед. времени, когда $t' = 1$ ед. (т. е.

лабораторные часы отстают). Вместе с тем для наблюдателя в лабораторной системе отсчета часы, расположенные в начале лабораторной системы пространственных координат, уже показывают больше 1 ед. времени (т. е. отстают часы на ракете). Это и есть замедление хода времени.

2.4. Хронологическая эволюция в СТО

Итак, для перехода от одной инерциальной системы отсчета к другой в СТО используются преобразования Лоренца, т. е. преобразования *поворота* в 4-мерном псевдоевклидовом пространстве. Эти преобразования образуют *группу Лоренца*, включающую вращения в трех чисто пространственных и в трех пространственно-временных плоскостях (последние три преобразования называются *бустами*).

Между тем существует более обширная группа преобразований в этом пространстве – *группа Пуанкаре*, которая, помимо преобразований поворота (т.е. группы Лоренца), содержит также операции сдвига вдоль трех пространственных и одной временной оси. Группа Пуанкаре характеризуется поэтому 10 параметрами. Для каждого из 6 вращений и 4 сдвигов можно ввести линейный дифференциальный оператор (генератор), позволяющий выразить в первом приближении отклонение вектора при малом отклонении соответствующего параметра преобразования (угла поворота или величины сдвига). При этом указанные *математические* операторы с точностью до размерной константы совпадают с основными *физическими* операторами (момента импульса, скорости, импульса и энергии). Именно по этой причине законы сохранения названных физических величин связаны с симметрией пространства Минковского относительно поворотов и сдвигов.

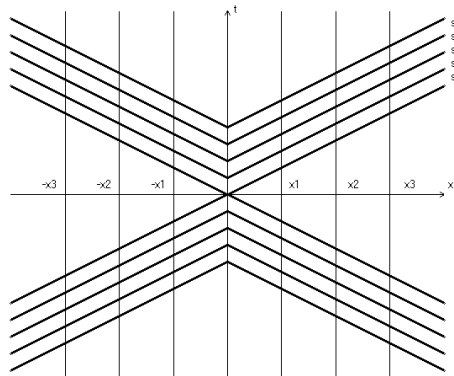


Рис. 2.5. Последовательность световых гиперповерхностей, отвечающая сдвигу Пуанкаре

Может показаться, что параллельный сдвиг во времени (назовем его сдвигом Пуанкаре) – единственно возможный вид отображения множества всех 4-мерных событий в себя, отвечающий переходу к новому моменту времени в качестве нулевого (т.е. текущего) отсчета. В этом случае для последовательности световых импульсов, испущенных из некоторой пространственной точки, мы получим ряд световых конусов, показанных на рис. 2.5. С течением времени, которое (течение) само по себе является уже не математическим, а *физическим* феноменом, точки одного светового конуса (например, s_0) переходят в точки следующего светового конуса (например, s_1), лежащие на той же самой временной вертикали (например, проходящей через координату x_1).

Однако такая модель хронологической эволюции, во-первых, не является априорно единственно возможной, а во-вторых (и это главное!) не удовлетворяет требованиям релятивистской инвариантности.

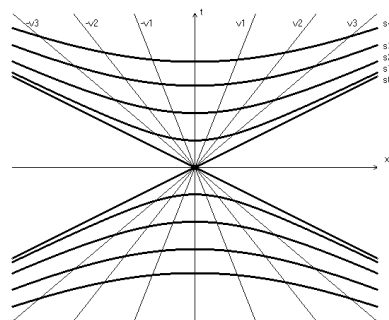


Рис. 2.6. Последовательность гиперповерхностей, отвечающая Е-сдвигу

Действительно, в другой системе координат выбранная нами линия, проходящая через координату x_1 , уже не будет параллельной оси времени. Кроме того, расстояния вдоль новой оси времени между световыми конусами в новой системе отсчета не будут равны этим расстояниям в старой системе. Поэтому выбранные нами два семейства геометрических мест не позволяют инвариантным образом параметризовать все множество 4-мерных событий и описать их (реальную) эволюцию во времени.

Для соблюдения требований релятивистской инвариантности нам необходимо выбрать другую пространственно-временную сетку (см. рис. 2.6). Как известно, инвариантно определенными при любых преобразованиях Лоренца оказываются семейства гиперповерхностей

$$t^2 c^2 - r^2 = \text{const},$$

расстояния между которыми по оси времени равны в любой системе отсчета. Далее, также инвариантным в любой системе отсчета оказывается положение прямых линий, соединяющих начало координат с заданной 4-мерной точкой. В результате мы фактически построили Лоренц-инвариантную систему координат¹. Аналогичным образом осуществима параметризация абсолютно удаленных *пространственных* слоев *вне* начального светового конуса, но мы не будем на этом останавливаться.

На самом деле мы также определили траектории “дрейфа” образов 4-мерных событий при некотором сдвиге во времени системы координат. Действительно, если все выбранные нами инвариантные гиперповерхности по оси времени расположены одна от другой на одном и том же расстоянии, то и расстояния между ними вдоль любой радиальной линии между собой также будут равны (каждая из этих линий играет роль оси времени в соответствующей системе координат). Соответственно, проекции отрезков этих линий на ось времени (и притом в любой системе координат) также будут равны между собой. Таким образом, мы имеем полное право определить такой *новый* тип сдвига во времени, при котором точки одной гиперповерхности в точности переходят в соответствующие точки следующей гиперповерхности, т.е. имеет место как бы “параллельный” перенос этих поверхностей. Для хронологического оператора, реализующего подобный эволюционный сдвиг, я предлагаю использовать название “Е-оператор” (как больше понравится читателю – от слова “эволюция” или в честь автора теории относительности).

Этот Е-сдвиг, по-существу, определяет не параллельный перенос оси времени в какой-либо случайно выбранной системе координат, а сдвиг *интервала* в пространстве Минковского. Далее, пространственные сдвиги и все вращения должны теперь также определяться в 4-мерной точке не для произвольно выбранной системы координат, а по отношению к соответствующей гиперповерхности и соответствующему направлению скорости. В совокупности все эти модифицированные преобразования образуют новую 10-параметрическую Е-группу, т.е. замкнутое множество операций, и порождают соответствующие генераторы. В частности, Е-

¹ Построенные гиперповерхности соответствуют координатам наблюдателей Риндлера (см., например, http://en.wikipedia.org/wiki/Rindler_space).

оператор энергии соответствует симметрии пространства Минковского не вдоль *произвольно* выбранной оси времени, а вдоль объективно заданной *мировой линии инерциального движения* пробного тела.

2.5. Парадоксы часов и близнецов в специальной теории относительности

Теперь, наконец-то, мы можем перейти к парадоксу часов в теории относительности. Рассмотрим сначала случай относительного инерциального движения двух тел и связанных с ними двух наблюдателей, снабженных часами. Поскольку, согласно СТО, движущиеся часы идут медленнее неподвижных, *каждый* из двух наблюдателей полагает, что время в его системе отсчета течет быстрее, чем в системе другого наблюдателя.

Указанную коллизию СТО предлагает считать несущественной в силу следующего обстоятельства [Ландау и Лифшиц, 1967]. Экспериментально сравнить непосредственные показания двух часов невозможно без нарушения инерциального характера движения, по крайней мере, одного из тел, например, путем поворота и возвращения к первому телу. Действительно, при этом такое тело неминуемо должно изменить свою скорость, т.е. претерпеть ускорение.

Возможен и другой способ, при котором показания движущихся часов (K') сравниваются в начальной точке с показаниями одних неподвижных часов (K_1), а в конечной точке — с показаниями вторых неподвижных часов (K_2). Разумеется, неподвижные часы K_1 и K_2 должны заранее быть строго синхронизированы между собой.

При этом возникает весьма любопытная ситуация. Пусть мы имеем не двое часов, а *две* бесконечные пространственные решетки, в *каждом* узле которых находятся часы. Первая решетка связана с неподвижным наблюдателем, а вторая решетка — с движущимся наблюдателем, так что все часы второй системы движутся относительно любых часов первой системы с одной и той же скоростью. Разумеется, все часы каждой из решеток строго синхронизированы между собой в своей системе отсчета.

Пусть теперь мы зафиксировали момент, когда некоторые часы В второй решетки проходили мимо конкретных часов A_1 первой решетки. Будем теперь следить за дальнейшим движением часов В. Проходя мимо часов A_2 , движущиеся часы отстанут, как установит *неподвижный* наблюдатель (или механический регистратор) в точке A_2 , на некоторый интервал Δt . Затем, проходя мимо часов A_3 , движущиеся часы отстанут на интервал $2\Delta t$, и так далее. Иными словами, возникает *наклонная линия постоянства координаты* для часов В в системе отсчета А, а мы обратим внимание на важный получающийся результат: *различие* в показаниях неподвижных и движущихся часов *пропорционально расстоянию* между этими часами!

С парадоксом часов тесно связан парадокс близнецов, который возникает, если все же попытаться сравнить между собой показания *одних и тех же часов*. В книге [Тэйлор и Уилер, 1971] парадокс близнецов излагается следующим образом (на основе оригинальной идеи, приведенной в [Лаури, 1963]).

Близнецы Петр (Космонавт) и Павел (Землянин) расстались в тот день, когда им исполнилось по 21 году. Космонавт отправился на ракете в направлении оси x на 7 лет *своего* времени со скоростью $\beta = 24/25 = 0,96$ скорости света, после чего сменил скорость на обратную и за 7 лет (опять-таки *своего* времени) вернулся назад на Землю, тогда как Землянин оставался на Земле. Спрашивается, сколько лет было Космонавту и сколько — Землянину в момент их встречи на Земле?

Поскольку и Космонавт, и Землянин находились в относительном движении друг относительно друга, то *оба*, казалось бы, должны наблюдать замедление хода часов друг друга. Будучи вложено в уста *Землянина*, это простое утверждение приводит к тому, что часы Космонавта, как и процесс старения организма Космонавта, шли замедленно, так что Космонавт оказался моложе своего брата-близнеца после возвращения. “Но ведь если это утверждение справедливо,— рассуждает *Космонавт*,— то почему *не я*, когда я провожу

исследование, обнаруживаю, что часы Землянина идут замедленно? Как же это он смог постареть сильнее, чем я?”

Чтобы лучше уяснить ситуацию, следует представить себе ракету Космонавта, летящую вместе с инерциальной системой отсчета (вначале — от Земли). Эта система состоит из трех взаимно ортогональных стержней (“система координат”) и снабжена часами. Когда же Космонавт меняет скорость на обратную, то пусть его система отсчета продолжит свое *прежнее* (инерциальное!) движение от Земли, а с ракетой теперь будет связана *другая* (такая же) инерциальная система отсчета, но уже летящая к Земле. Таким образом, первый и второй этапы движения связаны с *двумя различными* инерциальными системами отсчета. Действительно, ни одна *инерциальная* система *по определению* не может изменить направления и скорости движения!

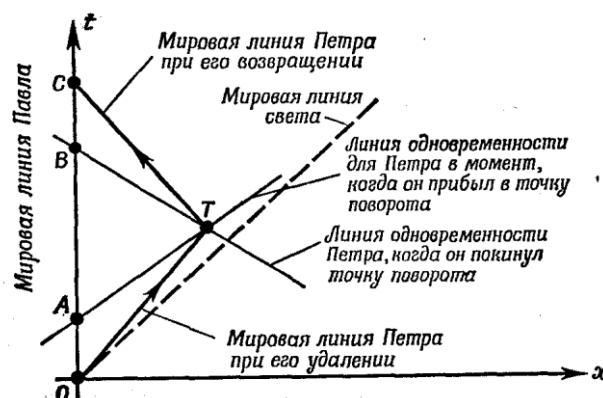


Рис. 2.7. Как Космонавт (Петр) проводит учет процесса старения Землянина (Павла).

После того, как Космонавт построил диаграмму своего движения, получилась следующая картина (рис. 2.7). В период удаления Космонавта (отрезок **OT** его мировой линии на диаграмме) его часы показали, что прошло семь лет. Проведя линию одновременности через точку **T**, мы получим на мировой линии Землянина отрезок **OA**, отвечающий промежутку времени в 1,96 года («замедление хода часов», наблюдаемое Космонавтом из движущейся системы отсчета).

Аналогичным образом рассматривая период возвращения Космонавта (отрезок **TC** его мировой линии на диаграмме), мы установим, что его часы показали — прошло еще семь лет. Проведя *другую* линию одновременности через точку **T**, мы получим на мировой линии Землянина отрезок **BC**, отвечающий промежутку времени в 1,96 года (такое же «замедление хода часов», снова наблюдаемое Космонавтом из движущейся системы отсчета). Землянин снова состарился лишь на 1,96 года!

Но учет, проделанный до сих пор из *двух* инерциальных систем Космонавта, еще не полон. Ни в одной из этих систем не учтен отрезок **AB**, также соответствующий прошедшему времени. Этот отрезок составляет 46,08 года (поправка на скачкообразное (!) изменение линии одновременности для *двух* систем отсчета Космонавта — удаляющейся и возвращающейся вместе с ним).

Противоречие разрешается, если учесть отрезок времени **AB**. Космонавт обнаружит, что учет этого времени соответствует поправке, необходимой *при переходе между системами одновременности в удаляющейся и возвращающейся системах отсчета*. Отдельный расчет дает для этого отрезка времени значение в 46,08 года. Такую поправку следует добавить к времени, прошедшему у Землянина, которое было измерено часами Космонавта на двух этапах его движения. Теперь Космонавт может окончательно вычислить возраст Землянина (включая 21 год — возраст последнего к началу путешествия):

$$21+1,96+46,08+1,96=71 \text{ год.}$$

Сам же он может радоваться своей относительной молодости:

$$21+14=35 \text{ лет}$$

Попробуем выразить ОА и ОС в более общих обозначениях. Время по часам Землянина откладывается вдоль времени t . Обозначим половину полного времени отсутствия Космонавта на Земле через $T = OC/2$. Согласно мнению Космонавта, он летит от Земли всего лишь в течение времени $T' = T\sqrt{1-\beta^2}$, и обратно к Земле – столько же, а скачок времени **AB** возникает лишь для Землянина. Очевидно, каждая половина этого скачка составит

$$\Delta T = T - T' = T(1 - \sqrt{1-\beta^2}) \approx T\beta^2/2$$

Проблема парадокса часов может быть, как указывается в [Тэйлор и Уилер, 1971], изящно разрешена с помощью учета эффекта Доплера (E. Feenberg, American Journal of Physics, 27, 190, 1959).

Вспомним, что Землянин оставался на Земле, тогда как Космонавт летал с огромной скоростью βc до далекой звезды и обратно на Землю. Пусть они оба наблюдали удаленную переменную звезду, яркость которой попеременно ослабевает и увеличивается с частотой ν в системе отсчета Земли (ν' в системе отсчета ракеты). Предположим, что расстояние до этой переменной звезды намного превышает длину пути Космонавта, а направление на нее в системе отсчета Земли перпендикулярно направлению движения Космонавта. *Оба наблюдателя зарегистрируют одно и то же общее число пульсаций переменной в течение всего путешествия Космонавта от его вылета до возвращения.* Исходя из этого факта и из формулы для доплеровского смещения

$$\nu' = \nu \frac{1}{1 - \beta \cos \varphi}$$

при данном угле наблюдения $\varphi = 90^\circ$ в лабораторной системе отсчета можно найти, что к концу путешествия Космонавт постареет всего на 14 лет, тогда как Землянин — на все 50.

2.6. Парадокс близнецов и “радарное” время

Хотя парадокс близнецов изучен, казалось бы, со всех сторон, новые исследования, посвященные ему, продолжают открывать все новые его грани (см. также раздел 5.5). В работе² [Долби и Гулл, 2001] обращено внимание на некоторые проблемы, связанные с этим парадоксом и вызывавшие известные психологические трудности. Авторы этой работы воспроизводят (см. рис. 2.6) типовые диаграммы из учебников с мировыми линиями Землянина (вертикальная линия справа) и Космонавта (ломаная линия слева).

В точке “мгновенного” поворота (E) происходит скачкообразное изменение угла наклона линий одновременности Космонавта (авторы назвали ее Барбарой) по отношению к мировой линии Землянина (Алекса). При этом точки G и H представляются Космонавту одновременными, но на мировой линии Землянина, с точки зрения Космонавта, им отвечают два разных момента времени! Что касается некоторого события N на мировой линии Землянина, которое лежит между этими точками, то Космонавт также должен приписать ему уже не *одно*, а

² Благодарю П.В. Куракина за возможность ознакомиться с этой работой на его сайте - Автор

два *различных* значения времени, причем *после* ускорения значение временной координаты на мировой линии космонавта оказывается меньшим, чем *до* ускорения (см. рис. 2.8)!

Еще большая трудность возникает слева от точки поворота. Здесь линии одновременности пересекаются, и Космонавт, таким образом, должен ставить в соответствие каждому событию даже не два, а *три* различных момента времени!



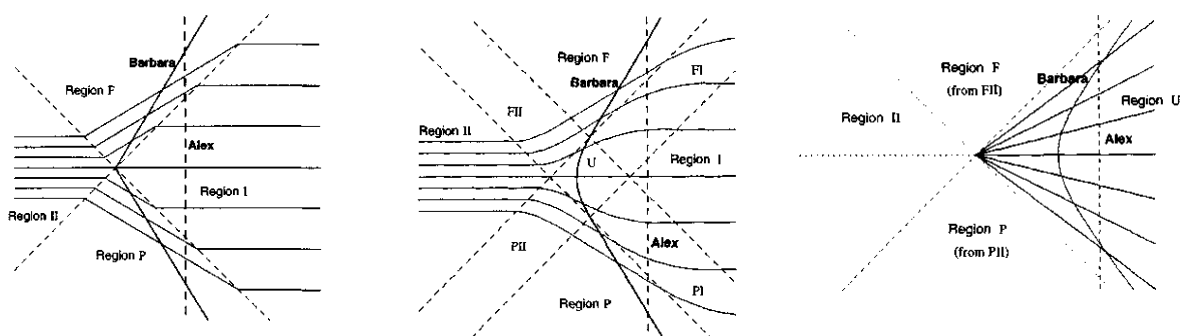
а) “мгновенный” поворот

б) “плавный” поворот

Рис. 2.8. Линии одновременности (обычное время) Космонавта в парадоксе близнецов.

Эта неоднозначность может быть принципиально устранена, если вместо обычного времени наблюдателя использовать так называемое “радарное” время. Последнее определяется как половина *собственного* времени, необходимого свету для прохождения от 4-точки одного мирового события до 4-точки другого, и обратно. Важно отметить, что это определение (восходящее к Эйнштейну, а затем Бонди) не зависит от выбора системы координат, т.е. величина радарного времени не изменяется при любом преобразовании системы координат. (Более того, только эта физическая величина может использоваться при реальном сравнении времен – М.Х.Ш.) Таким образом, нет причин не применять радарное время к ускоренным наблюдателям или искривленным областям пространства-времени. Оно однозначно определено, согласовано с собственным временем вдоль пути наблюдателей и инвариантно по отношению к обращению времени, т.е. к изменению знака собственного времени наблюдателя.

На рис. 2.9 представлены линии (гиперповерхности) одновременности для трех типов поворота Космонавта.



а) “мгновенный” поворот

б) “плавный” поворот

б) “равномерно-ускоренный” поворот

Рис. 2.9. Линии одновременности (“радарное” время) Космонавта в парадоксе близнецов.

2.7. Эксперименты с мюонами

Очень ясное изложение принципиальной схемы реальных опытов с релятивистскими мезонами приведено в [Нэйв, 2003]. Объектом опыта является поток мюонов, летящих на землю с очень большой скоростью (0,98 скорости света), так что имеем

$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - \beta^2} = 5$$

Постоянная времени полураспада мюона составляет 1,56 микросекунды, процесс распада летящих мюонов играет роль своеобразных движущихся часов. В качестве показаний двух нужных нам неподвижных часов будем использовать число мюонов, регистрируемых при равных условиях на двух различных высотах – на высоте 10 км и на уровне земли. Понятно, что количество зарегистрированных мюонов – совершенно объективный и однозначный показатель, не зависящий от выбора системы отсчета.

Параметр	Релятивистский расчет		Нерелятивистский расчет
	В движущейся системе, связанной с мюоном	В неподвижной системе, связанной с Землей	
Расстояние между двумя счетчиками	2 км	10 км	10 км
Время движения между двумя счетчиками	6.8 мкс	34 мкс	34 мкс
Постоянная времени полураспада	1.56 мкс	7.8 мкс	1.56 мкс
Отношение времени движения к постоянной времени полураспада	4.36	4.36	21.8
Доля первоначального числа мюонов, достигающая земли	0.049	0.049	0.0000003

Результаты расчетов (отвечающие реальным экспериментам) приведены в таблице, и мы приступаем к их обсуждению, переходя от нижних строк к верхним. Прежде всего, отметим, что теория относительности дает число мюонов, достигающих Земли, более чем на 4 порядка выше, чем при нерелятивистском подсчете, и согласуется с результатами опыта. Это действительно связано с релятивистским замедлением времени – отношение времени движения к постоянной времени полураспада составляет не 21.8, а только 4.36, что при экспоненциальной зависимости и дает столь существенное отличие.

Указанное замедление времени “внутренних часов” мюона должен учитывать при релятивистском расчете неподвижный наблюдатель, связанный с Землей. Именно с его точки зрения очень-очень быстро движущиеся мюоны распадаются в $\gamma = 5$ раз медленнее, так что их постоянная времени полураспада оказывается равной 7.8 мкс, а не 1.56 мкс. Далее неподвижный относительно земли наблюдатель делит расстояние между счетчиками (10 км) на скорость движения мюонов, находит время движения между счетчиками равным 34 мкс, а отношение этого времени к релятивистски замедленной постоянной полураспада (7.8 мкс) равным 4.36.

Когда же мы производим релятивистский анализ в системе отсчета, связанной с движущимся мюоном, мы вместо замедления времени должны учитывать другой хорошо известный релятивистский эффект – сокращение расстояния. Движущийся наблюдатель должен исходить из того, что в его системе отсчета расстояние от одного счетчика числа мюонов до другого составляет уже не 10 км, а в $\gamma = 5$ раз меньшее, т.е. 2 км, поскольку (с его точки зрения) он очень-очень быстро движется относительно этого промежутка, разделяющего указанные два высотных уровня! Поскольку расстояние, проходимое при этом Землей, кажется ему в 5 раз

меньше (2 км, а не 10 км), а взаимная скорость движения одинакова в обеих системах отсчета, то и время движения между счетчиками окажется (с точки зрения движущегося наблюдателя) также в 5 раз меньше (6.8 мкс, а не 34 мкс). Вместе с тем движущийся наблюдатель законно считает (ведь с его точки зрения мюоны неподвижны), что постоянная времени полураспада в точности равна 1.56 мкс. В результате он получает отношение времени движения между счетчиками к этой величине равным $6.8 \text{ мкс} / 1.56 \text{ мкс} = 4.36$, т.е. точно такое же, что и неподвижный относительно земли наблюдатель!

Таким образом, для часов, связанных с мюоном, расчеты в обеих системах отсчета, выполненные на основе *релятивистского* анализа, дали один и тот же результат.

2.8. Исходные представления общей теории относительности

Чтобы включить гравитацию в теорию относительности, А. Эйнштейн предложил использовать известный экспериментальный факт, согласно которому “ускорение в гравитационном поле не зависит от химического состава или физического состояния тел...” Это означает, что *инертная* масса любой материальной частицы всегда пропорциональна ее *гравитационной* массе, так что при надлежащем выборе физических единиц эти массы можно считать равными.

Благодаря этому факту, описание поведения частиц в однородном гравитационном поле можно заменить описанием их поведения в отсутствие поля в ускоренной (неинерциальной) системе отсчета. Так, если некоторый лифт свободно падает вниз в поле тяжести Земли, то поведение всех находящихся внутри него предметов было бы точно таким же, если бы поле тяготения вдруг исчезло, но наблюдатель при этом двигался бы вверх с ускорением, численно равным ускорению g свободного падения.

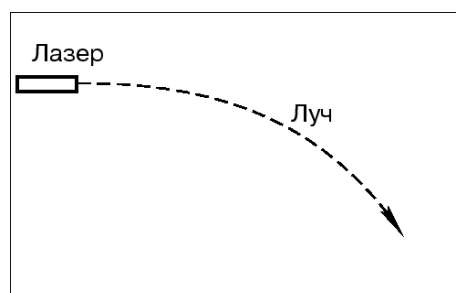


Рис. 2.10. Траектория луча света в поле тяжести ([Сажин]).

Это относится не только к обычным частицам, но и, например, к световым фотонам. Пусть в неподвижном лифте в невесомости лазер испускает свет, который распространяется прямолинейно (горизонтально). Для движущегося вверх с ускорением наблюдателя траектория распространения света уже не будет прямолинейной, а отклонится вниз. Отсюда следует, что в поле тяготения в неподвижном лифте свет также отклонится вниз, а вот в свободно падающем лифте для находящегося там наблюдателя луч света будет прямолинейным (см. рис. 2.10, заимствованный из лекций [Сажин]).

В общей теории относительности (ОТО) сформулированный выше тезис о том, что гравитационное поле можно (локально) заменить равноускоренной системой отсчета, принимается справедливым и в обратном толковании: ускорение тела можно приписать возникновению однородного гравитационного поля. Таким образом, свойства движения в неинерциальной системе отсчета такие же, как в инерциальной системе при наличии гравитационного поля. Следовательно, неинерциальная система отсчета эквивалентна некоторому гравитационному полю. Это обстоятельство называют принципом эквивалентности.

Таким образом, для наблюдателя в свободно падающем лифте все законы физики такие же, как и в инерциальных системах отсчета специальной теории относительности (по крайней мере, в непосредственном соседстве с центром лифта, т.е. *локально*).

Действие ускоренного движения и силы тяжести полностью взаимно компенсируются. Наблюдатель, сидящий в закрытом лифте и регистрирующий силы, представляющиеся ему гравитационными, не может сказать, какая доля этих сил обусловлена ускорением и какая — действительными гравитационными силами. Он вообще не обнаружит никаких сил, если только на лифт не действуют какие-либо другие (т.е. отличные от гравитационных) силы.

Из принципа эквивалентности следуют два важных вывода о распространении света в гравитационном поле.

- В гравитационном поле свет, как уже было отмечено, распространяется по кривой (не по прямой).
- При распространении света в гравитационном поле, вообще говоря, меняется его частота.

Второй эффект — изменение частоты света в гравитационном поле — заключается в следующем. Пусть наблюдатель, находящийся на Земле, посылает световой сигнал наблюдателю, находящемуся на некоторой высоте над поверхностью Земли, например, на вершине высокой башни. Эффект состоит в том, что наблюдатель на башне измерит несколько меньшую частоту, чем та, которая была послана наблюдателем с Земли. Это есть так называемое *гравитационное красное смещение*.

Объяснение этого эффекта заключается в следующем. Гравитационное поле g эквивалентно неинерциальной системе отсчета, движущейся вверх с ускорением $a = -g$. Пусть расстояние между наблюдателями (находящимися в ракете, движущейся с ускорением a) равно H . При распространении фотона вверх его первоначальная энергия $mc^2 = \hbar\omega_1$ уменьшится на величину mgH и станет равной $\hbar\omega_2$, где

$$\omega_2 = \omega_1 (1 - gH/c^2)$$

Эффект красного смещения очень мал. Так, при $H = 20$ м относительное изменение частоты составит примерно $2 \cdot 10^{-15}$. Однако этот фантастически малый эффект был действительно измерен Паундом и Ребкой в 1960 г. для гамма-лучей (используя эффект Мёссбауэра). Башня в Гарвардском университете имела высоту 22,5 м, и частота используемых гамма-квантов $\omega_\gamma = 2,2 \cdot 10^{19}$ сек⁻¹. Отношение измеренного изменения частоты к предсказанному теорией значению было равно $1,05 \pm 0,10$.

Следствием гравитационного красного смещения является то, что фотон частоты ω , покидающий звезду и уходящий в бесконечность, будет восприниматься в бесконечности с частотой $\omega' = \omega(1 - GM/Rc^2)$, где M — масса звезды, R — ее радиус. Так, для Сириуса В вычисленное относительное смещение составляет $-5,9 \cdot 10^{-5}$, а измеренное равно $-6,6 \cdot 10^{-5}$.

2.9. Парадокс часов в общей теории относительности

Фигурирующее выше в формуле для изменения частоты света произведение gH равно изменению гравитационного потенциала φ . В конечном счете, когда наблюдатель движется в поле с потенциалом φ со скоростью v , его собственное время τ связано (в первом приближении) с координатным временем наблюдателя τ' как

$$d\tau = d\tau' (1 + \varphi/c^2 - v^2/2c^2)$$

Чем выше потенциал φ , отсчитанный от нуля (т.е. от потенциала точки, где гравитация отсутствует), тем медленнее течет время. Поэтому, например, большее время покажут те часы, которые расположены дальше от Солнца, т.е. ближе к бесконечно удаленной точке с нулевым потенциалом. Теперь формулы для изменения темпа течения времени в зависимости от скорости и высоты используются в навигационной технологии GPS и ГЛОНАСС.

Вернемся еще раз к парадоксу часов. В рамках СТО мы выяснили, что только одна из двух систем отсчета – система остававшегося на Земле Землянина – может рассматриваться как инерциальная. Космонавт, вначале улетающий от Земли, а затем возвращающийся к ней, на каждом из этих двух этапов был связан соответственно с двумя *различными* инерциальными системами отсчета, и парадокс возникает именно в связи с его переходом из одной системы отсчета в другую.

ОТО предлагает метод расчета течения времени как раз на этапе этого перехода. Воспользуемся приближенным методом, приведенным в [Толмен, 1974]. Нам достаточно рассмотреть лишь три этапа:

- инерциальный полет ракеты при удалении от Земли на расстояние H (этап старта нас не интересует, ракета могла просто пролететь мимо Земли, запустив часы в момент, когда она с ней поравнялась)
- изменения скорости (торможение) с величины v до величины $-v$
- инерциальный полет ракеты при возвращении к Земле (этап финиша нас также не интересует, ракета могла просто пролететь мимо Земли, остановив часы в момент, когда она с ней поравнялась)

С точки зрения летящего на ракете Космонавта, на первом и последнем тапах Землянин инерциально двигался относительно него, и потому часы Землянина часы должны показать *меньшее* время

$$(\tau_1 + \tau_3) = (\tau'_1 + \tau'_3) \sqrt{1 - \beta^2} \approx (\tau'_1 + \tau'_3) (1 - v^2/2c^2)$$

(штрихом отмечены показания часов Космонавта, нештрихованные величины отвечают показаниям часов Землянина с точки зрения летящего на ракете Космонавта).

Что же происходит с Землянином по мнению Космонавта на этапе торможения ракеты? Космонавт может считать, что к Землянину в начале 2-го этапа скачком прикладывается (в положительном направлении) однородное поле тяготения, которое в конце 2-го этапа скачком же выключается. Под действием этого поля скорость Землянина меняется от $-v$ до $+v$. Остается проделать вычисления, которые покажут, что длительность этого этапа для Землянина перекрывает ту “экономия” времени, которую он осуществил (с точки зрения Космонавта) на 1-м и 3-м этапах.

Согласно ОТО (и пренебрегая скоростью на этапе торможения), на втором этапе время торможения по часам Землянина составит

$$\tau_2 = \tau'_2 (1 + \varphi/c^2) = \tau'_2 (1 + gH/c^2)$$

Учтем, что ускорение g можно записать в виде

$$g = 2v/\tau'_2$$

а пройденный путь H - в виде

$$H = v \tau'_1$$

Тогда получим:

$$\begin{aligned} \tau_2 &= \tau'_2 (1 + gH/c^2) = \tau'_2 [1 + (2v/\tau'_2)(v \tau'_1)/c^2] = \\ &= \tau'_2 [1 + (2v^2/c^2)(\tau'_1/\tau'_2)] = \tau'_2 + \tau'_1 (2v^2/c^2) \end{aligned}$$

Учитывая симметрию 1-го и 3-го этапа, положим

$$\tau_1 = \tau_3 = \tau, \quad \tau'_1 = \tau'_3 = \tau',$$

Тогда

$$\tau_2 = \tau'_2 + \tau' (2v^2/c^2)$$

Теперь вычислим суммарное время для трех этапов:

$$2\tau + \tau_2 = 2\tau' (1 - v^2/2c^2) + \tau'_2 + \tau' (2v^2/c^2) = \\ = \tau' (2 - 2v^2/2c^2 + 2v^2/c^2) + \tau'_2 = \tau' (2 + v^2/c^2) + \tau'_2$$

(Как указано выше, штрихом отмечены показания часов Космонавта, нештрихованные величины отвечают показаниям часов Землянина с точки зрения летящего на ракете Космонавта).

Иными словами, суммарное время трех этапов по часам Землянина с точки зрения летящего на ракете Космонавта составит

$$T_{\text{сумм}} = \tau' (2 + v^2/c^2) + \tau'_2$$

Разность суммарного времени между часами Землянина и Космонавта в системе отсчета Космонавта составит:

$$\Delta T_{\text{сумм}} = [\tau' (2 + v^2/c^2) + \tau'_2] - [2\tau' + \tau'_2] = \tau' v^2/c^2$$

Как видим, время торможения τ'_2 в рассматриваемом приближении вообще *не вошло* в выражение для разности $\Delta T_{\text{сумм}}$, а также в отношение этой разности к суммарной длительности *первого и третьего* этапов (этап торможения сюда не включен):

$$\delta = \Delta T_{\text{сумм}} / 2 \tau' = 1/(2 v^2/c^2)$$

Таким образом, согласно мнению Космонавта, показания часов Землянина должны *превысить* показания его собственных часов в $(1 + \delta)$ раз по отношению к суммарной длительности *первого и третьего* этапов. Напомним, что согласно СТО показания часов Землянина, по мнению Космонавта, должны были быть, напротив, *меньше* этой суммарной длительности в $(1 + \delta)$ раз.

Что касается системы отсчета Землянина, то она является инерциальной, время торможения Космонавта можно положить равной нулю и, в строгом соответствии со СТО, с точки зрения Землянина показания часов Землянина должны *превысить* показания часов Космонавта в $(1 + \delta)$ раз по отношению к суммарной длительности этапов удаления и возвращения Космонавта.

Таким образом, парадокс часов в рамках ОТО исчезает благодаря характеру течения времени на этапе торможения часов.

2.10. Эксперименты по проверке общей теории относительности

Об экспериментах, подтверждающих выводы ОТО относительно темпа течения времени, рассказывается, в частности, в [Сажин]:

Первый эксперимент был сделан в 1971 г. Четверо часов, сделанных на основе цезиевых стандартов частоты, были помещены на два самолета и совершили кругосветное путешествие. Одни часы путешествовали в восточном направлении, другие обогнули Землю в западном направлении. Разница в скорости хода времени возникала из-за добавочной скорости вращения Земли, при этом учитывалось и влияние поля тяготения на полетной высоте по сравнению с уровнем Земли. В результате эксперимента удалось подтвердить общую теорию относительности, измерить различие в скорости хода часов на борту двух самолетов.

Измерения временной задержки, зависящей от потенциала, были сделаны четыре года спустя. Исследователи синхронизовали двое часов, затем поместили одни часы на вершину горы, а вторые оставили на физическом факультете, расположенном у подножья горы. Разница в высоте составляла 3250 м. Время за которое измерялась задержка часов составляло 66 дней. Из-за различия в потенциале гравитационного поля Земли скорости

хода часов были различны. Измерения опять подтвердили общую теорию относительности и измерили задержку с точностью 15%.

Два года спустя подобный эксперимент был повторен в Японии. Исследователи поместили одни часы на гору, а другие под гору. Разница высот составляла 2818 м, а время измерения эффекта было две недели. Поскольку часы, используемые японскими исследователями, были значительно точнее, точность измерений составляла 5%. Вновь предсказания общей теории относительности были подтверждены.

Одни из наиболее точных измерений были сделаны во время высотного полета ракеты. На борту ракеты находился водородный мазер, который использовался в качестве высокостабильных часов. Ракета поднялась на 10 000 м, а затем упала в Атлантический океан. Для измерений потенциального члена в задержке часов пришлось компенсировать вклад доплеровского члена (ракета двигалась быстро), а также ионосферные эффекты. Тем не менее, измерения были благополучно проведены и правильность формулы для времени задержки была подтверждена с точностью 0.01%.

Процитируем, наконец, сравнительно свежую статью [Ям, 2004]:

Сегодня в продаже имеются GPS-приемники, определяющие свое положение с точностью до 15 м. Чтобы погрешность была меньше 30 м, координаты нужно вычислять с учетом релятивистской поправки. При синхронизации часов GPS-приемника с часами спутника нельзя пренебрегать влиянием скорости на ход времени. Согласно теории относительности, в быстро движущихся объектах время течет медленнее, чем в неподвижных. Каждый спутник системы GPS мчится по орбите со скоростью около 14 тыс. км/ч, а значит, атомные часы на нем отстают от земных примерно на 7 мкс за сутки.

Еще сильнее на ход времени влияет тяготение. На орбите навигационных космических аппаратов, средний радиус которой составляет около 26 тыс. км, сила земного притяжения примерно в 4 раза меньше, чем на поверхности планеты. Поэтому часы на спутниках уходят вперед на 45 мкс за сутки. В итоге в системе GPS приходится вводить поправку в 38 мкс. Если этого не делать, то ошибка определения расстояния будет нарастать со скоростью 11 км в сутки. (На самом деле все несколько сложнее, поскольку спутники обращаются не по круговым, а по эллиптическим орбитам, и их удаленность от Земли периодически меняется.)

В 1970-х г.г. военным разработчикам первого варианта системы GPS необходимость внесения релятивистских поправок не казалась столь очевидной. Одни специалисты считали учет влияния скорости и тяготения необходимым, а другие - совершенно излишним. Прийти к единому мнению так и не удалось, поэтому первый навигационный спутник все-таки оснастили системой коррекции времени, но не включили ее, рассчитывая задействовать только в случае необходимости. Очень скоро выяснилось, что она должна работать постоянно.

2.11. Стационарная космологическая модель Эйнштейна

Как известно, классическая теория тяготения основывалась на законе Ньютона. Ньютонианская концепция Вселенной в качестве своей существенной предпосылки использует представление о бесконечном трехмерном пространстве, заполненном материей. Такая концепция, как было показано в конце 19-го столетия, приводит к определенным трудностям. В. Паули в книге [Паули, 1947] со ссылкой на работы Неймана и Зеелигера напоминает, что закон всемирного тяготения Ньютона может быть строго применен лишь в том случае, если плотность массы Вселенной при стремлении расстояния к бесконечности стремится к нулю быстрее, чем $1/r^2$. В противном случае сила, действующая на материальную точку со стороны всех масс Вселенной, будет неопределенной. Описанная проблема получила название гравитационного парадокса. В 1917 году Альберт Эйнштейн в работе [Эйнштейн, 1917]

сослался на ту же трудность теории тяготения Ньютона для бесконечной Вселенной. Он также отметил, что граничное условие Ньютона в форме существования постоянного предела для гравитационного потенциала в пространственной бесконечности влечет за собой обращение на бесконечности в нуль плотности материи.

Эту проблему Эйнштейну удалось преодолеть в рамках релятивистской теории тяготения. Исходным пунктом для обобщения послужило дифференциальное уравнение Пуассона, связывающее в классической теории распределение в 3-мерном пространстве *скалярного* гравитационного потенциала с распределением масс. Эйнштейн предпринял следующие шаги: 1) перешел от скалярных величин и 3-мерных векторов к 4-мерным векторам и тензорам; 2) сформулировал основное уравнение поля, приравняв тензор энергии-импульса матери к тензорной величине, характеризующей кривизну пространства.

Кривизна пространства означала, что такая Вселенная *может не быть бесконечной* во всех трех пространственных направлениях (что обязательно присуще *плоскому* пространству). Бесконечная Вселенная оказывалась возможной, только если средняя плотность материи в ней была бы равна нулю. В противном случае Вселенная имеет конечный радиус R в пространстве³, поэтому гравитационный парадокс исчезает, исчезает и необходимость задания произвольных пространственных граничных условий (например, на бесконечности). В первоначальной модели Эйнштейна Вселенная представляла собой 4-мерный цилиндр, который в любом пространственном сечении давал трехмерную сферу, тогда как образующая цилиндра соответствовала оси времени. Постоянство пространственного радиуса Вселенной отвечало отсутствию ее эволюции во времени, т.е. сугубо стационарной модели. В 1916 году Эйнштейн и предположить не мог, что размер Вселенной во времени может изменяться.

Итак, в космологическое уравнение Эйнштейна входит средняя плотность материи, а также среднее ее давление. Учитывая малые скорости галактик, Эйнштейн (а за ним и все его последователи) положил это (динамическое) давление равным нулю. И все было бы замечательно, если бы полученное уравнение Эйнштейна имело решение. Но решения с нулевым давлением не существовало. Более того, не существовало и решения с положительным давлением, давление могло быть только отрицательным. Вероятно, это обстоятельство повергло Эйнштейна в шок. Он, однако, придумал формальный выход, имевший самые далеко идущие последствия.

С одной стороны, он не решился явно допустить отрицательное давление, предельно лаконично мотивируя это так [Эйнштейн, 1953]:

Возражением против такого решения является то, что приходится вводить отрицательное давление, для чего нет никаких физических оснований.

С другой стороны, он тут же выпускает этого джинна с черного хода, введя “руками” в уравнение дополнительную константу Λ и придумав ей название “космологическая постоянная”, а давление как таковое приняв равным нулю. Разумеется, физический смысл этой константы все равно сводится к *отрицательному* давлению, и Эйнштейн, оправдываясь, пишет:

Вещество состоит из электрически заряженных частиц. В рамках теории Максвелла они не могут быть поняты как свободные от особенностей электромагнитные поля. Чтобы не противоречить фактам, в выражение для энергии необходимо ввести дополнительные члены, не содержащиеся в теории Максвелла, которые обеспечили бы устойчивость электрически заряженных частиц, несмотря на взаимное отталкивание составляющих их одноименно заряженных частей. Именно в связи с этим Пуанкаре предположил, что внутри этих частиц имеется давление, которое и компенсирует электростатическое отталкивание. Нельзя, однако, определенно утверждать, что это давление исчезает вне

³ Эйнштейн нашел, что $R = (2MG)/(c^2\pi)$, где M – масса Вселенной, G – гравитационная постоянная Ньютона, c – скорость света; таким образом, R оказывается в π раз меньше так называемого “гравитационного радиуса” Вселенной.

частиц. Мы придем к согласию с этими представлениями, если в нашем феноменологическом рассмотрении добавим член, описывающий давление. Это давление, однако, не следует смешивать с гидродинамическим давлением, поскольку оно служит лишь энергетическим выражением динамических связей внутри вещества.

Заметим, что Эйнштейн здесь совершенно ясно говорит о том, что это “эффективное” давление, связанное с постоянной Λ , должно быть *отрицательным* и призвано *компенсировать* “взаимное отталкивание частей”, т.е. способствовать их взаимному *притяжению*.

2.12. Нестационарная космологическая модель Эйнштейна-Фридмана (без космологической постоянной)

В 1929 году Эдвин Хаббл опубликовал свой знаменитый закон: галактики разлетаются со скоростью, пропорциональной расстоянию между ними, а значит – Вселенная расширяется, т.е. не может считаться стационарной. Еще за несколько лет до этого А.А. Фридман предложил теоретическое обобщение космологической модели Эйнштейна на нестационарные случаи. Таким образом, современные представления об эволюции Вселенной восходят к простейшей космологической модели Эйнштейна-Фридмана, оперирующей с трехмерным неевклидовым пространством *переменного во времени* радиуса кривизны R (т.е. со сферической гиперповерхностью 4-мерного евклидова шара). Указанное пространство предполагается в этой модели изотропным и заполненным “пылевидной” материей, а время выступает в качестве формального параметра, от которого и зависит “текущая” кривизна пространства. При этих предположениях уравнения Фридмана-Эйнштейна записываются в виде (см., например, сноску на стр. 47 в монографии [Зельдович, Новиков, 1975]):

$$\begin{aligned} k \cdot (c/R)^2 + (\dot{R}/R)^2 + 2(\ddot{R}/R) &= -8 \cdot \pi G \cdot P/c^2 \\ k \cdot (c/R)^2 + (\dot{R}/R)^2 &= 8 \cdot \pi G \cdot \rho/3, \end{aligned}$$

где G - постоянная в законе всемирного тяготения Ньютона, c - скорость света, ρ - плотность, P - давление, $k = 0, 1$ или -1 в зависимости от знака кривизны. Здесь символы $\dot{R}$ и $\ddot{R}$ обозначают первую и вторую производную R по времени соответственно. Заметим, что если эти производные обратить в ноль, то мы получим в точности уравнение Эйнштейна для *стационарной* модели.

Скалярное давление, которое содержится в правой части первого уравнения, может быть обусловлено скоростями частиц, т.е. связано с их кинетической энергией, так что для покоящейся материи такое (динамическое) давление равно нулю. Как уже было сказано, первоначально Эйнштейн пытался использовать отрицательное давление, не связанное с движением материи, чтобы получить не зависящее от времени решение. Это был вынужденный шаг с его стороны, поэтому позже он отказался от этой идеи в пользу нестационарного решения, предложенного Фридманом (в этой модели присутствие Λ уже необязательно).

Хорошо известны три класса таких решений (найденных при условии *постоянства* энергии Вселенной), выбор между которыми зависит от соотношения между реальной (ρ) и “критической” (ρ_0) величиной средней плотности материи во Вселенной в настоящую эпоху:

- при $\rho > \rho_0$ радиус кривизны сначала растет со временем, а затем убывает, кривизна положительна;
- при $\rho_0 > \rho > 0$ радиус кривизны неограниченно возрастает со временем, кривизна отрицательна;
- при $\rho = \rho_0$ Вселенная имеет плоскую метрику, кривизна отсутствует.

Здесь под критической плотностью подразумевается величина

$$\rho_0 = 3 \cdot H^2 / (8 \cdot \pi G)$$

где H – параметр (“постоянная”) Хаббла. Отметим, что в случае $\rho = \rho_0$ параметр Хаббла оказывается обратно пропорциональной возрасту Вселенной.

На рис. 2.11. приведены графики возможной эволюции Вселенной (заимствованные из книги [Эйнштейн, 1953]) в зависимости от соотношения между ρ и ρ_0 .

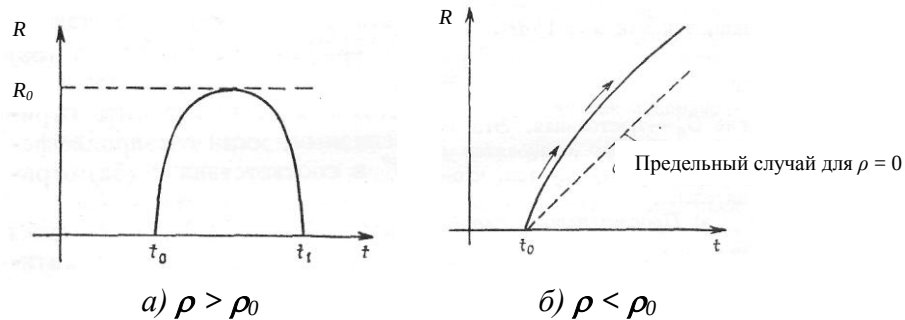


Рисунок 2.11. Типы эволюции Вселенной (при $\Lambda = 0$)

Завершу краткое изложение первоначальной космологической модели Эйнштейна-Фридмана, подчеркнув принципиальное обстоятельство: и давление, и плотность материи вводятся в уравнения “внешним” образом. Эти параметры в правой части уравнений определяют неизвестные параметры в левой части, так что решение уравнений сводится к поиску формальных зависимостей неизвестных *геометрических* величин от заданных *физических* величин. В эти зависимости в качестве аргумента включают и *время*, предварительно *постулировав* априорное наличие этой физической сущности.

2.13. Стандартная космологическая модель с ненулевой космологической постоянной

В настоящее время (к 2011 г.) накоплено огромное количество данных астрофизических наблюдений, в основном – с помощью космических спутников. Опираясь на эти данные и так называемую Горячую модель Большого взрыва (согласно которой наша Вселенная однородна и изотропна на больших масштабах и заполнена “остывшим” реликтовым излучением), можно рассчитать ряд базовых космологических параметров – возраст Вселенной, плотность различных компонент материи, и др.

Основываясь на сравнении реально наблюдаемого спектра мощности реликтового излучения с теоретически рассчитанным, был сделан вывод о том, что геометрия пространственной Вселенной является *плоской*. Из этого был сделан следующий вывод – суммарная плотность ρ материи во Вселенной практически равна критической величине ρ_0 .

При этом оказалось, что согласовать между собой теоретические предсказания и данные наблюдений в рамках нестационарной модели Эйнштейна-Фридмана, используя *нулевое* значение космологической константы Λ , невозможно. Более того, конкретное значение Λ современные космологи подбирают, исходя именно из данных наблюдений. Так теоретическая конструкция Эйнштейна, которую он впоследствии назвал своей “грубой ошибкой”, была восстановлена в статусе неотъемлемой части космологии. По сути дела, величина Λ в стандартной космологической модели (СКМ, SCM) играет роль *дополнительного* (свободного, “введенного руками”) параметра, с помощью которого удается согласовать теорию и реальность.

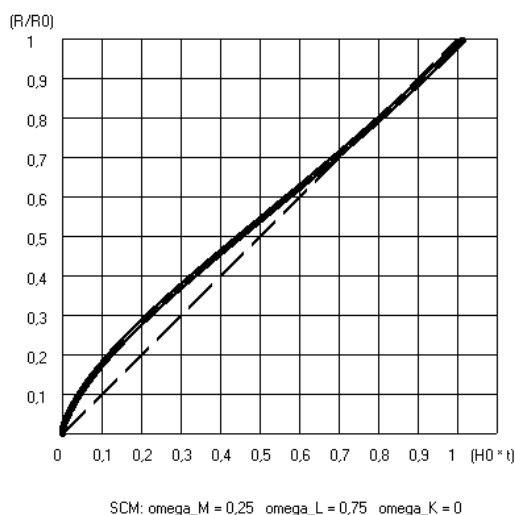


Рисунок 2.12. Эволюция Вселенной в стандартной космологической модели (со специально подобранными значениями Λ и ее отдельных составляющих).
Для наглядности пунктиром изображена прямая линия

На рис. 2.12 приведена зависимость безразмерного радиуса Вселенной R (здесь R_0 – современное значение радиуса) от ее безразмерного возраста (H_0 – современное значение параметра Хаббла), полученная в стандартной космологической модели при следующих специальных допущениях о плотностях различных компонент материи: вклад кривизны пространства равен нулю (пространство плоское), относительный вклад за счет Λ (“темная” энергия) равен 75%, вклад остальной материи (включая барионную) составляет 25%.

Как можно видеть, космологическая постоянная в этой модели играет весьма существенную роль. Ее значение было существенным образом определено по данным систематизированных наблюдений за вспышками Сверхновых в середине 2000-х. В свою очередь, как принято считать, полученная кривая (рис. 3.2) влечет за собой важный и нетривиальный вывод: эволюция размера Вселенной во времени является нелинейной, причем в течение примерно последней четверти возраста Вселенной ее расширение происходит с ускорением⁴.

⁴ Я оспариваю это утверждение в дальнейшей части книги.

3. О ЧЕРНЫХ ДЫРАХ, МЕТАБОЛИЧЕСКОМ ВРЕМЕНИ И ЛИНЕЙНОМ РАСШИРЕНИИ ВСЕЛЕННОЙ. НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Историческое отступление

Мои первые самостоятельные размышления на темы космологии датируются 1993 годом. Логика развития идеи сейчас уже не совпадает с логикой ее изложения в данной книге. Есть опасность, что читателю будет трудно понять (или отследить), каким образом в этой новой модели возникает связь между черными дырами, метаболическим временем и *линейным* (в этом метаболическом времени) расширением Вселенной. Поэтому в данном разделе я кратко опишу именно логику *исторического развития* идеи, а уж в последующих буду стараться следовать внутренней логике самой модели (какой она мне сейчас представляется).

На первом этапе, задумавшись над идеями Н.А. Козырева, я попытался представить себе расширение чисто пространственной 4-мерной евклидовой шарообразной Вселенной. Мне в голову пришла мысль о том, нельзя ли *отождествить* понятие времени с радиусом Вселенной – тогда не потребуются никакое дополнительное конструирование этого понятия, и сразу получает исчерпывающее объяснение его универсальность.

Но здесь возникает конфликт с космологией общей теорией относительности (ОТО). Как читатель мог видеть из раздела 2.12, в общепринятой космологической модели зависимость *радиуса* Вселенной от ее *возраста* в общем случае вовсе не является линейной! После довольно долгих размышлений я увидел выход из этой ситуации. Как я уже заметил выше, *стандартный* подход к решению системы уравнений Эйнштейна-Фридмана (ЭФ) состоит в том, чтобы принять давление материи P равным нулю (если пренебречь давлением света). Если же отказаться от этого принудительного приравнивая, то *существует* решение с линейной по времени зависимости радиуса от времени. При этом давление оказывается заранее неизвестной функцией радиуса, которая находится в результате решения. Более того, и плотность материи, распределение которой при стандартном подходе также должно было задаваться внешним образом, теперь опять-таки не должна задаваться, а оказывается величиной, определяемой в результате решения.

Все это было хорошо, но были и два новшества, поначалу меня крайне смутившие. Во-первых, найденное давление оказывалось существенно *отрицательным* (а авторитет Эйнштейна казался незыблемым). Во-вторых, в новой модели не выполнялся закон сохранения энергии, что в течение уже нескольких столетий должно вселять в каждого физика (или причисляющего себя к их числу) суеверный ужас⁵.

Прошло значительное время, пока я вдруг осознал, почему получающееся давление действительно должно быть отрицательным. Это самое давление является ни чем иным, как проявлением энергии гравитационного поля, а ведь гравитация характерна именно тем, что заставляет частицы материи стягиваться к общему центру, а не разбегаться (что происходит с частицами газа).

Еще более интересное объяснение оказалось у вывода о несохранения количества энергии и материи во Вселенной. Закон сохранения энергии (в соответствии с известной теоремой Нётер) обусловлен *однородностью* времени, т.е. *неизменностью физики* в течение всего периода существования Вселенной. Но в ОТО физика самым существенным образом зависит от геометрии Вселенной – в частности, компоненты фундаментального метрического тензора (а значит, и сила тяготения) зависят от радиуса кривизны Вселенной. Поэтому время (в глобальном масштабе) никак нельзя считать однородным. Все это означало, что законы сохранения вытекают из свойств пространства-времени, а не могут быть произвольно заданными в качестве внешних условий. Например, в классической механике закон сохранения

⁵ Как отметил в ходе своего публичного доклада С.Я. Беркович, Парижская Академия наук постановила не рассматривать проекты, связанные с нарушением закона сохранения энергии, на том же заседании, на котором отвергла принципиальную возможность существования “небесных камней” (метеоритов).

энергии справедлив только при условии, что функция Лагранжа не зависит явно от времени (так, если масса частицы зависела бы явно от времени, то это, очевидно, не соответствовало бы закону сохранения).

Факт несохранения (линейного нарастания) энергии и массы во Вселенной натолкнул меня на мысль, что это сильно похоже на то, что происходит с черной дырой (ЧД). Поглощая материю извне, черная дыра необратимо увеличивает свою массу и свой размер, т.е. расширяется подобно нашей Вселенной. Таким образом, масса и размер ЧД параметризуют текущее состояние черной дыры (как годовые кольца – эволюцию дерева). Можно использовать размер ЧД для определения ее собственного *параметрического* времени – это время *течет* только тогда и постольку, когда и поскольку увеличивается масса ЧД.

Но может ли наша Вселенная быть черной дырой? Как часто бывает, пытаюсь ответить на этот вопрос, я прошел три стадии. Первая стадия – счастливый ужас от собственной дерзости и мысль о том, что научное сообщество дружно скажет: этого не может быть, потому что не может быть никогда! Во всяком случае, оно должно было бы испугаться этой идеи, поняв, к каким следствиям это ведет.

Однако спустя определенное количество лет наступила вторая стадия: я начал встречать публикации, в которых так или иначе эта мысль если не прямо, то косвенно, все же высказывалась. В конце концов в 2010 году я обнаружил в электронном Архиве статью Ли Смолина [Smolin, 1994], в которой рассматривалась гипотеза, восходящая, по словам автора статьи, еще к Джону Арчибальду Уилеру:

Можно предположить, что каждая черная дыра в нашей Вселенной приводит к созданию новой вселенной и, соответственно, большой взрыв в нашем прошлом есть результат формирования черной дыры в иной вселенной. (Перевод мой – МХШ)

Много лет я пытался убедить научное сообщество рассмотреть эту гипотезу как *одну из возможных*, но научное сообщество меня не слушало, так что я практически потерял надежду узнать при своей жизни, прав ли я.

Однако уныние действительно является большим грехом и должно преодолеваться. Ответ пришел с совершенно неожиданной стороны. Простое, но неопровержимое рассуждение, основанное на в общем-то известных фактах, перевело вопрос в третью стадию: этого просто *не может не быть*, наша Вселенная *должна* быть черной дырой! Доказательство этого утверждения элементарно. Рассмотрим бесконечную Вселенную, обладающую *заданной* (средней) плотностью ρ и бесконечной массой. Выделим мысленную сферу достаточно малого радиуса R . Увеличивая радиус нашей виртуальной сферы, мы тем самым будем увеличивать ее массу M (а значит – и гравитационный радиус R_G) пропорционально *кубу* геометрического радиуса. Иными словами, геометрический радиус R пропорционален кубическому корню из массы M . Нелинейность этой зависимости означает, что, начиная с некоторого критического значения (зависящего от плотности ρ), гравитационный радиус *обязательно* превысит геометрический размер сферы, т.е. она *неизбежно* превратится в черную дыру, для которой *критическая* плотность $\rho_{cr} \sim (R_G)^{-2}$ совпадет с заданной плотностью ρ . Таким образом, вследствие неотвратимости коллапса, Вселенная не может быть бесконечной.

Отношение (ρ/ρ_0) для различных астрофизических объектов

Объект	Масса M (кг)	Радиус R (м)	Гравитационный радиус R_G (м)	$(\rho/\rho_0) = (R_G/R)^3$
Земля	$6 \cdot 10^{24}$	$6 \cdot 10^6$	10^{-2}	$\sim 10^{-26}$
Солнце	$2 \cdot 10^{30}$	$7 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^3$	$\sim 10^{-16}$
Млечный Путь	$3 \cdot 10^{42}$	$\sim 10^{19}$	$\sim 10^{15}$	$\sim 10^{-12}$
Вселенная	$\sim 10^{53}$	$\sim 10^{26}$	$\sim 10^{26}$	~ 1

Рассмотрим теперь нашу Вселенную, средняя плотность которой порядка 10^{-29} г/см³. В вышеприведенной таблице представлены результаты расчета параметра (ρ/ρ_{cr}) близости объекта к состоянию гравитационного коллапса для различных астрофизических объектов. Из таблицы следует, что наша Вселенная действительно должна находиться в состоянии гравитационного коллапса.

Заметим, что поскольку черная дыра *необратимо* увеличивает свою массу и поверхность горизонта событий, “питаясь” энергией и материей, она расширяется, подобно нашей Вселенной. Исходя из такой космологической концепции, можно получить много аргументов, свидетельствующих в ее пользу. Более того, она успешно, с моей точки зрения, выдерживает конкуренцию со стороны Стандартной Космологической Модели.

В то же время наша Вселенная представляется изотропной, тогда как теория черных дыр рассматривает их как существенно неізотропные объекты. Если для *внешнего* наблюдателя ЧД отождествляется со своего рода сферической двумерной мембраной (ограничивающей трехмерную сферу), то для *внутреннего* наблюдателя почти все известные решения дают 3-мерные (и весьма экзотические) зависимости от радиуса, предельно далекие от изотропии.

Однако такие решения (и в том числе “ужасные” сингулярности) получаются в результате *продолжения вовнутрь* внешних решений. Но были предложены и иные подходы (см. ниже), где сингулярностей нет. Я пришел к еще более радикальной идее: при коллапсе ЧД происходит топологическое изменение пространства-времени. Таким образом, в нашей Вселенной черные дыры – это 2-мерные объекты не только с точки зрения внешнего наблюдателя, но и в принципе, внутри них нет ничего – ни материи, ни сингулярности, ни пространства-времени.

А если наша Вселенная – это гиперсферическая 3-мерная оболочка (черная дыра) в некоторой внешней 4-мерной (материнской) вселенной? Тогда все сходится с той моделью, которая возникла в моей голове первоначально. Анализ теоретических и эмпирических следствий из этой модели, приведенный ниже, все более укрепляет меня в мысли, что она ближе к действительности, чем стандартная космология.

Далее в этой главе я перехожу к развернутому изложению и обсуждению предпосылок и результатов своей космологической модели, которую я называю Теорией Шаровой расширяющейся Вселенной (ТШРВ). Я рассмотрю вопросы, связанные с давлением материи, процессом коллапса, эволюцией черных дыр и происхождением времени, новым решением уравнений Эйнштейна-Фридмана и вытекающими из этого предсказаниями.

3.2. Представления Эйнштейна и статическое давление гравитирующей материи

Критический анализ модели Эйнштейна начнем с вопроса о правомерности отказа от учета давления. Разумеется, для покоящейся материи *динамическое давление равно нулю*, но остается открытым вопрос о *статическом давлении*. Данный вопрос, как показало его предварительное устное обсуждение, является главным источником возражений со стороны большинства специалистов по ОТО, поэтому я хотел бы уделить ему особое внимание.

У самого Эйнштейна источником появления скалярного давления явилось специально добавленное слагаемое, которое не нарушает ковариантности уравнения. Априорное исключение этого слагаемого – скорее, вопрос субъективного выбора, чем строгого теоретического обоснования. Уже этого обстоятельства достаточно (с чем согласны многие авторы) чтобы, по крайней мере, подвергнуть анализу возможные следствия такой модификации уравнений. В то же время с *математической* точки зрения вполне законным является и непосредственное вхождение компонент давления в тензор плотности энергии-импульса.

Физическая аргументация в пользу учета статического давления основывается на концепции эффективного гравитационного взаимодействия материи, не связанного со скоростью частицы. Наиболее простой, с моей точки зрения, аргумент в пользу учета давления сводится к тому, что пренебрежение им равносильно пренебрежению суммарным

гравитационным полем Вселенной, а это последнее, в свою очередь, однозначно связано с наличием глобальной кривизны, т.е. отличием от нуля радиуса кривизны Вселенной и постоянной Хаббла. Материю во Вселенной нельзя считать простым скоплением невзаимодействующей “пыли”. Напротив, каждый островок материи связан жесткими путями тяготения, по крайней мере, с соседними островками, так что вся материя в целом образует более или менее упругую структуру с распределенной в пространстве энергией. Давление же, по определению, обусловлено как раз объемной плотностью энергии.

Рассматриваемый вопрос отчасти связан с формулировкой принципа эквивалентности, которая была дана Эйнштейном. Дело здесь заключается в том, что Эйнштейн устанавливает (локальную) эквивалентность ускорения и гравитационного поля для *точечной* материальной частицы, используя уровень идеализации, характерный для *механики точки*. В работе [Эйнштейн, 1916] он пишет: “Ускоренное движение бесконечно малой (“местной”) координатной системы должно быть выбрано при этом так, чтобы отсутствовало гравитационное поле; для бесконечно малой области это возможно”. На этом уровне вводится абстракция *внешнего* источника и (локально) *однородного* поля, причем расстояние между взаимодействующими телами существенно превышает размеры самих тел. Энергия покоя тел локализована в их объеме, который по размерам во много раз меньше объема области, занимаемого гравитационным полем; следовательно, объемной концентрацией энергии последнего (т.е. внутренней энергии деформации среды) вполне допустимо пренебречь.

Однако возможны случаи, когда размеры области, занимаемой полем, не превосходят размеров взаимодействующих тел или, тем более, их гравитационного радиуса, и именно эта ситуация имеет место при глобальном рассмотрении Вселенной. Здесь гипотеза даже о локальной однородности поля тяготения уже неприменима, и необходимо перейти на более тонкий понятийный уровень – уровень *механики сплошной среды*. Поэтому в рамках ОТО при анализе эквивалентности в общем случае необходимо рассматривать не точечную частицу, а элемент материальной среды, занимающий элементарный объем. В неподвижной системе, на которое действует поле тяготения внешнего источника, элементарный объем заполнен материей, сжатой в результате ее взаимного притяжения. При переходе к ускоренной системе исключение гравитационного поля *внешнего* источника не позволяет исключить *собственную* гравитационную деформацию объема материи и соответствующее давление за счет выбора какой бы то ни было локальной системы отсчета.

Вообще допустимость использования приближения локально однородного поля тяготения заслуживает отдельного обсуждения. Прежде всего, полезно дать количественное определение критерия локальной однородности, например, в виде $\Delta g/g \ll 1$, где Δg – разность между наибольшим и наименьшим значением напряженности, g – среднее значение напряженности в этой области. Используя такой критерий, можно аргументировать невыполнение условия локальной однородности как для статического поля тяготения, изображенного ниже на рисунке 3.1, так и, например, для поля вращающегося тела, если только отношение скорости углового перемещения к скорости поступательного не является достаточно малым (и при условии, что само поступательное движение достаточно медленное, чтобы рассматривать его участки как эквивалентные локально однородным областям поля).

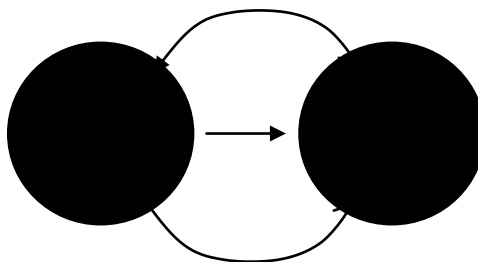


Рис. 3.1. Поле, не допускающее локальной однородности

Приведенная мной аргументация в какой-то степени созвучна критике идей ОТО со стороны А.А. Логунова и его школы. В работе [Логунов, 1988] указывается:

... несмотря на успехи, ОТО почти с самого своего рождения столкнулась с трудностями. ... Э. Шредингер в 1918 г. показал, что соответствующим выбором системы координат все компоненты, характеризующие энергию-импульс гравитационного поля, вне сферически симметричного тела можно обратить в нуль ... Сначала этот результат показался Эйнштейну удивительным, но затем после анализа он ответил следующим образом: “Что же касается соображений Шредингера, то их убедительность заключается в аналогии с электродинамикой, в которой напряжения и плотность энергии любого поля отличны от нуля. Однако я не могу найти причину, почему так же должно обстоит дело и для гравитационных полей. Гравитационные поля можно задавать, не вводя напряжений и плотности энергии” ... Или еще: “...для бесконечно малой области координаты всегда можно выбрать таким образом, что гравитационное поле будет отсутствовать в ней” ...

Мы видим, что Эйнштейн сознательно отошел от классического понятия поля как материальной субстанции, которую даже локально никогда нельзя уничтожить выбором системы отсчета, и сделал он это во имя локального принципа эквивалентности сил инерции и гравитации, который был возведен им в ранг фундаментального принципа, хотя физических оснований для этого не было и нет. Все это и привело к представлению о невозможности локализации гравитационной энергии в пространстве. ... ни сам Эйнштейн, ни другие физики не осознали, что в ОТО в принципе невозможны законы сохранения энергии-импульса и момента количества движения.

... внимательный анализ показывает, что в рассуждениях Эйнштейна и Клейна содержится простая, но принципиальная ошибка. ... Суть ее заключается в том, что величина, которой оперировал в своих рассуждениях Эйнштейн, отождествив ее компоненты с энергией и импульсом, просто равна нулю.

Таким образом, принятие концепции ОТО ведет к отказу от ряда фундаментальных принципов, лежащих в основе физики. Во-первых, это отказ от законов сохранения энергии-импульса и момента количества движения вещества и гравитационного поля, вместе взятых. Во-вторых, отказ от представления гравитационного поля как классического поля типа Фарадея—Максвелла, обладающего плотностью энергии-импульса. Для многих физиков, занимающихся ОТО, это неясно и до сих пор, другие же склонны рассматривать отказ от законов сохранения как величайшее достижение теории, низвергнувшей такое понятие, как “энергия”.

... Гравитационное поле описывается симметрическим тензором и является реальным физическим полем, обладающим плотностью энергии и импульса... Такое определение гравитационного поля возвращает ему физическую реальность, поскольку его уже даже локально нельзя уничтожить выбором системы отсчета, а следовательно, нет никакой (даже локальной) эквивалентности между гравитационным полем и силами инерции.

Должен, однако, отметить, что, соглашаясь с А. А. Логуновым в критической части, я пытаюсь идти далее совершенно иным путем. Это проявляется в целом ряде различий между выводами его релятивистской теории гравитации (РТГ) и результатами, к которым приводит развиваемый мной подход. Вот некоторые из этих различий:

- РТГ настаивает на строгом выполнении законов сохранения, тогда как я связываю меру невыполнения этих законов с мерой отклонения от однородности и изотропности, точнее – с тем, что наша Вселенная не является *замкнутой* физической системой.
- РТГ утверждает, что геометрия пространства-времени “с необходимостью оказывается псевдоевклидовой (иными словами, теория строится в пространстве Минковского), ... фридмановская однородная и изотропная Вселенная бесконечна, и она может быть только плоской”, я же прихожу к римановой геометрии положительной кривизны.

- РТГ утверждает, что истинного коллапса в смысле ОТО не существует, в то время как я не разделяю этой точки зрения РТГ.
- Плотность вещества во Вселенной, согласно полученному мной решению, равняется удвоенной критической плотности.

Вместе с тем, важное утверждение РТГ соответствует полученному и мною, а именно: суммарная плотность энергии вещества и гравитационного поля во Вселенной должна равняться нулю.

3.3. Что происходит при коллапсе

Анализ гравитационного коллапса часто основан на предположении, что реальный размер коллапсирующего объекта (например, звезды) много меньше его гравитационного радиуса, или этот объект вообще рассматривается в качестве материальной точки.

В монографии [Новиков, Фролов, 1986] рассматривается процесс возникновения черной дыры в результате сжатия сферической массы до размеров, меньше гравитационного радиуса. При анализе авторы этой монографии используют упрощенное предположение, что внутри сферы давление равно нулю, поскольку это позволяет “избавиться от эффектов, не имеющих непосредственного отношения к образованию черной дыры и только осложняющих решение...”. Собственно, из этого же упрощенного предположения исходили и авторы самой первой посвященной этому процессу публикации [Oppenheimer, Snyder, 1939], которые откровенно признали, что им “не удалось проинтегрировать эти уравнения, не полагая давление равным нулю”.

Между тем, такой подход может лишить наглядности некоторые важные и интересные особенности исследуемой ситуации, поэтому, с моей точки зрения, целесообразнее проводить анализ все же на основании решения Шварцшильда для задачи об идеальной однородной сфере (а не материальной точки) массы m из несжимаемой жидкости [Толмен, 1934]. Решение, найденное Толменом, можно представить в виде

$$\frac{3P}{\rho c^2} = \Phi(r, r_1, R) \equiv \frac{3\sqrt{1-(r/R)^2} - 3\sqrt{1-(r_1/R)^2}}{3\sqrt{1-(r_1/R)^2} - \sqrt{1-(r/R)^2}} \quad (*)$$

где r_1 – радиус сферы, r – текущее значение расстояния от центра сферы, R – радиус кривизны, обусловленной гравитационным полем:

$$R = \sqrt{\frac{3c^2}{8\pi\rho G}}$$

Здесь ρ – плотность однородной жидкости, из которой состоит сфера, G – гравитационная постоянная Ньютона, c – скорость света в вакууме. Поскольку “гравитационный радиус” (радиус Шварцшильда) равен

$$r_g = \frac{2mG}{c^2} = \frac{8\pi G \rho r_1^3}{3c^2},$$

то из последних соотношений мы получаем

$$R^2 \cdot r_g = r_1^3 \quad \text{и} \quad r_g = \frac{r_1^3}{R^2}$$

Таким образом, радиус кривизны R однозначно связан с гравитационным радиусом r_g и радиусом шара r_1 соотношением

$$\frac{r_g}{r_1} = \frac{r_1^2}{R^2}$$

Радиус кривизны R имеет размерность расстояния, как и должно быть. Далее, из (5) следует, что $(r_1 < R)$ влечет $(r_1 > r_g)$, и наоборот. Заметим также, что

$$\frac{\rho}{\rho_g} = \frac{r_g^2}{R^2} = \frac{(r_1^3 / R^2)^2}{R^2} = \frac{r_1^6}{R^6}$$

где ρ_g – плотность, отвечающая наступлению коллапса, т.е. условию $r_1 = r_g$.

Предколлапс

Толмен опубликовал свое решение (*), имея в виду соблюдение условия

$$r_g < r_1, \quad (**)$$

когда коллапс еще не наступил. Он писал, что это ограничение настолько слабое, что (к моменту публикации) не привело ни к каким противоречиям с данными астрофизических наблюдений (например, для Земли гравитационный радиус $r_g = 0.443$ см, $r_1 \approx 40000$ км). Этап, предшествующий коллапсу объекта, мы будем именовать предколлапсом. На этом этапе действительное решение для уравнения (*) существует, в силу присутствия радикалов четной степени, при выполнении условия

$$0 \leq r \leq r_1 < R. \quad (***)$$

В этом условии, на первый взгляд, не кроется ничего особо примечательного, по крайней мере, мне не удалось найти соответствующих упоминаний в литературе. Однако недаром говорится, что дьявол прячется в деталях. Знаменатель правой части выражения (*) представляет собой разность двух радикалов, которая в некоторых случаях может изменять свой знак, проходя через нулевое значение, а это приводит к появлению бесконечного биполярного разрыва на кривой безразмерного давления. Разрыв возникает при выполнении равенства $\frac{3}{2}\sqrt{1-(r_1/R)^2} = \frac{1}{2}\sqrt{1-(r/R)^2}$, откуда нетрудно вывести условие $r/R = \sqrt{9(r_1/R)^2 - 8}$.

Поскольку выражение под радикалом должно быть неотрицательным, мы находим граничное условие для кривизны R , обеспечивающее наличие биполярного разрыва давления⁶:

$$1 \geq (r_1/R) \geq \sqrt{8/9} = 2\sqrt{2}/3 \approx 0.943, \text{ или } 1 \leq R/r_1 \leq 1.0604.$$

На рис.3.2 приведены графики распределения давления при двух значениях кривизны R плотности и соответствующих значениях относительной плотности (ρ/ρ_g) , рассчитанных с

⁶ В монографии [Новиков, Фролов, 1986] со ссылкой на работу [Hagihara, 1931] указывается, что критической круговой орбитой, отделяющей устойчивые движения от неустойчивых, соответствует $r = 3r_g$, а скорость движения частиц по ней $v = c/2$. Удельная энергия $\tilde{E}$ частицы на единицу собственной энергии mc^2 при этом составляет $\sqrt{8/9} \approx 0.943$.

помощью соотношения $\rho/\rho_g = r_1^6/R^6$. Вдали от режима коллапса давление падает к границе сферы достаточно плавно, а ближе к наступлению коллапса приобретает более уплощенную по вертикали форму.

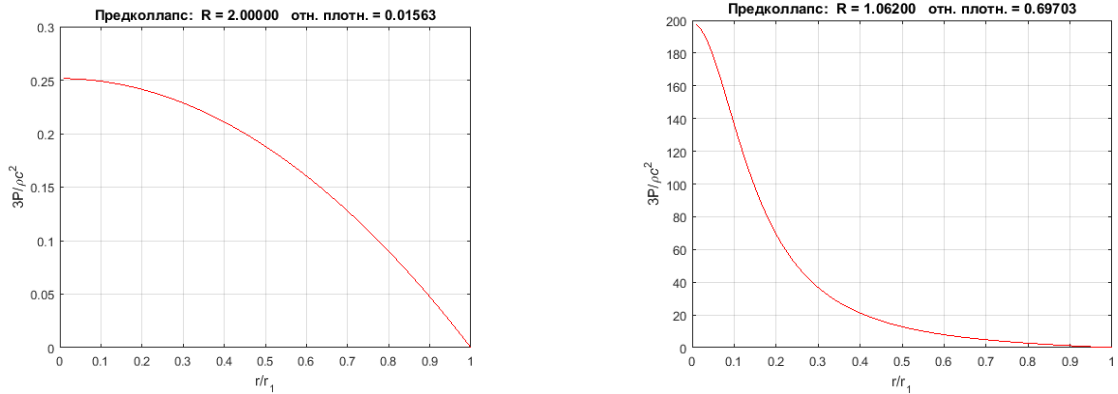


Рисунок 3.2.

Плавное распределение положительного давления от центра к периферии будущей ЧД (r – удаленность от центра сферы, r_1 – радиус сферы)

Когда достигается значение $(r_1/R) \approx 0.943$, непосредственно в центре сферы возникает биполярный разрыв давления, который по мере приближения к началу коллапса $(r_1/R) \rightarrow 1$ смещается от центра к самой границе сферы (рис. 3.3).

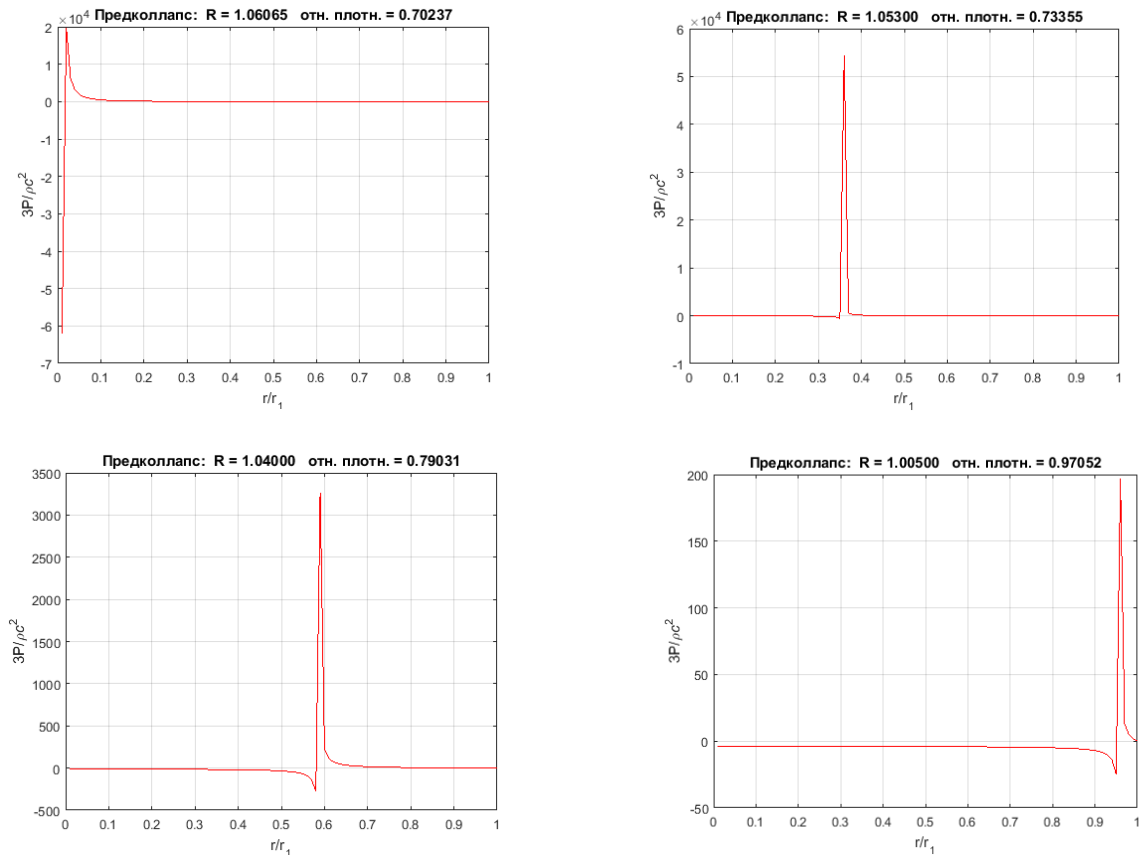


Рисунок 3.3.

Возникновение и миграция биполярного разрыва давления от центра к периферии будущей ЧД (r – удаленность от центра сферы, r_1 – радиус сферы)

Постколлпс

Вернемся к вопросу о существовании действительных решений для уравнения (*). Этап постколлпса наступает, когда кривизна R становится меньше (а гравитационный радиус r_g больше) размера сферы r_1 . Соответственно, плотность ρ материи, образующей сферу, становится больше критического значения ρ_g . Что же при этом происходит с радикалами, входящими в выражение (*)?

Ответ следующий: уже при $r_1 > R$ радикал $\sqrt{1-(r_1/R)^2}$ становится мнимым. Далее, при приближении к центру сферы другой радикал, а именно $\sqrt{1-(r/R)^2}$, сначала (при $r_1 > r > R$) также оказывается мнимым, но затем (при $0 < r < R$) он становится действительным. Следовательно, при выполнении условия

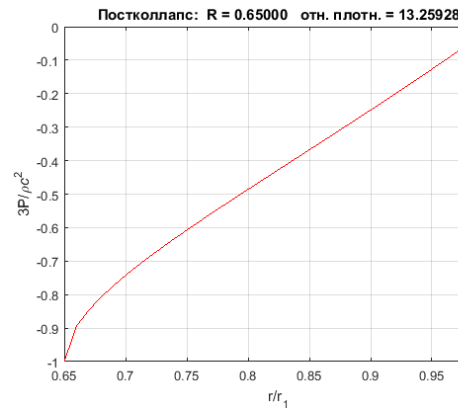
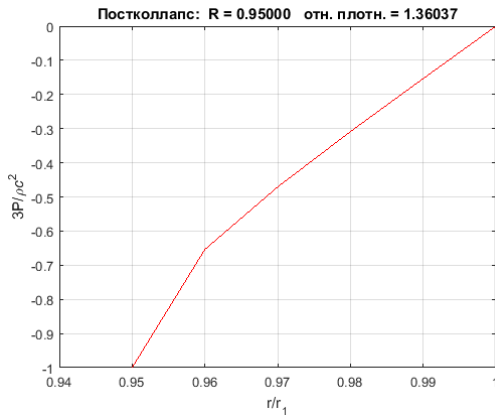
$$r_1 > r > R$$

на стадии постколлпса мы можем изменить знак под каждым из радикалов на противоположный, вынести в каждом из них мнимую единицу за знак радикала и затем сократить ее в числителе и знаменателе. Итоговое решение при выполнении последнего условия решение приобретет вид

$$\frac{3P}{\rho c^2} = \tilde{\Phi}(r, r_1, R) \equiv \frac{3\sqrt{(r/R)^2 - 1} - 3\sqrt{(r_1/R)^2 - 1}}{3\sqrt{(r_1/R)^2 - 1} - \sqrt{(r/R)^2 - 1}} \quad (****)$$

и будет, как мы видим на рис. 3.4, действительным для той части сферы, которая примыкает к ее внешней границе. Заметим, что давление оказывается отрицательным, т.е. прижимает материю к центру, способствуя, а не препятствуя коллапсу.⁷

В то же время для центральной части ЧД (ее “ядра”) давление будет описываться комплексной величиной, что позволяет заподозрить протекание в этой области достаточно быстрых периодических процессов.



⁷ Отрицательные давления не являются для физики чем-то новым. В обычных условиях давление тел положительно, т.е. направлено так, как если бы тело стремилось расширяться. Это, однако, не обязательно, и тело может находиться также и в состояниях с отрицательными давлениями: в таких состояниях тело как бы “растянуто” и потому стремиться сжаться. Например, отрицательным давлением может обладать перегретая жидкость; такая жидкость действует на ограничивающую ее поверхность с силой, направленной внутрь объема жидкости [Ландау, Лифшиц, 1976], §83.

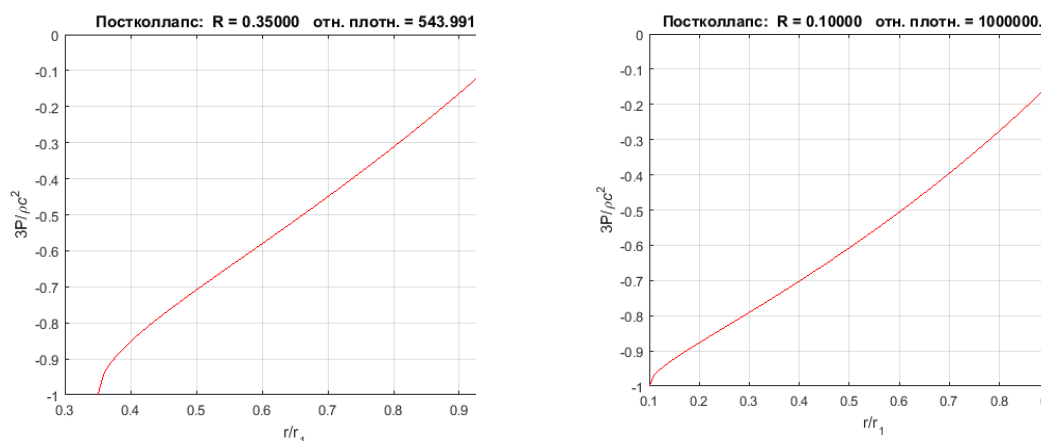


Рисунок 3.4
Распределение давления вне “ядра” ЧД при постколлпсе

3.4. О черных дырах и их “метаболическом” поведении

Итак, мы проследили стадии превращения (в процессе гравитационного коллапса) обычного тела в черную дыру (ЧД). Иными словами, ЧД возникают в результате коллапса материи под действием сил тяготения. Возникшая таким образом область пространства причинно не связана со своим окружением, т.к. никакая массивная частица и никакой сигнал не могут выйти за ее пределы и перенести информацию о ее природе и состоянии.

Что же происходит после этого с ЧД? А вот что – они поглощают объекты своего окружения и *необратимо* расширяются именно вследствие и по мере этого. Такое поведение подобных астрофизических объектов невольно вызывает ассоциацию с поведением живых существ и их популяций, осуществляющих метаболический обмен с окружающей средой.

Но для живых существ и популяций (вообще для каждой эволюционирующей системы) можно ввести характерную единицу времени, которая позволяет разумным образом выразить “возраст” системы. Например, в эмбриологии – это интервал между двумя последовательными делениями клетки, в экологии, генетике и этнографии – это время между сменами поколений. В своих работах А.П. Левич (см. [Левич, 1989, 2003, 2004]) для каждого произвольного эволюционирующего объекта предложил ввести некоторое абстрактное время в качестве *линейной* меры его изменчивости, в том или ином варианте принять его равным количеству меняющихся элементов. Время, измеряемое по “часам” той или иной динамической системы, Левич предлагает именовать “параметрическим” и понимать его как индикатор при отображении процесса изменчивости в линейно упорядоченное, метризованное множество. Он указывает, что любые изменяющиеся системы потребляют некоторый *ресурс*. Этот ресурс характеризуется набором числовых характеристик системы, которые: 1) с необходимостью сопровождают изменчивость системы; 2) растут монотонно с изменением системного времени и, тем самым, 3) могут служить для параметризации изменений. Количество “потребленного” ресурса и определяет так называемое “*метаболическое время*” системы. Все эти идеи оказываются вполне применимыми и к ЧД, если под характерным ресурсом понимать ее массу.

Большинство физиков стали принимать черные дыры всерьез лишь в конце 60-х годов. Оказалось, что черная дыра в некотором смысле допускает очень простое описание: оно определяется (подобно описанию элементарной частицы) всего тремя (!) степенями свободы – массой, моментом вращения и электрическим зарядом. Впервые математическое описание статичной невращающейся черной дыры дал Карл Шварцшильд в 1916 году. Затем в 1916 – 1918 г.г. Ханс Райсснер и Гуннар Нордстрём получили решение, учитывающее наличие у невращающейся ЧД электрического заряда. Далее, в 1963 году Рой Керр нашел стационарное осесимметрическое решение для вращающейся ЧД, но без заряда. И наконец, к 1965 г. было получено наиболее полное решение Керра – Ньюмена, учитывающее все три фактора. Сейчас

астрофизики выделяют три основных типа черных дыр: первичные ЧД (возникшие в момент рождения Вселенной), ЧД звездной массы (до десятков солнечных масс) и сверхмассивные черные дыры (СМЧД) в центрах галактик с массой в миллионы солнечных масс.

Вернемся к концепции эволюции на основе метаболизма. Итак, черные дыры возникают и эволюционируют, поглощая материю и энергию из внешней среды. В своей работе Ли Смолин (см. [Smolin, 1994]) ее автор напоминает гипотезу Дж. Уилера о том, что каждая ЧД – это новая расширяющаяся вселенная, подобная нашей, причем каждый вновь родившийся экземпляр Вселенной может немного отличаться от “родителя” значениями фундаментальных физических констант. Смолин относит к их числу массы протона, нейтрона, электрона и нейтрино, а также константы связи слабых, сильных и электромагнитных взаимодействий. Делая ряд правдоподобных допущений, Смолин на примере конкретных процессов эволюции звезд в спиральных галактиках анализирует, как вариации этих констант могут повлиять на “численность потомства” ЧД (по его оценке, в нашей Вселенной рождается сотни черных дыр в секунду). Оказывается, что подобного рода спонтанные малые вариации должны в общем случае приводить к *уменьшению* числа рождающихся ЧД. Таким образом, возникает некий механизм эволюции, стабилизирующий параметры фундаментальных физических законов во Вселенной: он обеспечивает максимум производства черных ЧД. Считаю важным добавить, что ЧД – это объекты с максимальной энтропией, поэтому максимум их производства соответствует *максимальному* темпу роста энтропии во Вселенной. С другой стороны, в моей недавней работе было показано, что “энтропийные” свойства ЧД, отражаемые обобщенным вторым началом термодинамики Бекенштейна и так называемым “голографическим пределом” для энтропии системы, являются продолжением свойств обычного гравитирующего тела ([Шульман, 2010б]).

Интересно также отметить, что различные дочерние черные дыры возникают в разные моменты времени и растут с различной скоростью. Гипотетически возможно, что некоторые из этих дыр могут расширяться столь стремительно, что в конечном счете могут поглотить всю материнскую вселенную.

3.5. Свойства черных дыр: взгляд внешнего наблюдателя

Практическую космологию интересует, прежде всего, описание ЧД с точки зрения внешнего наблюдателя. В 70-х годах 20-века был предложен новый для теории черных дыр “мембранный” подход. В соответствии с ним горизонт событий (граничная поверхность) ЧД выглядит для внешнего наблюдателя как *двумерная физическая мембрана из вязкой жидкости* с определенными механическими, электрическими и термодинамическими свойствами, пишут авторы статьи [Новиков, Фролов, 2001].

Площадь горизонта событий в общем случае математически выражается всего через три независимых параметра: массу, заряд и момент вращения черной дыры. Поэтому можно выразить малое приращение *массы* в виде суммы трех слагаемых, обусловленных приращениями *площади горизонта, углового момента и заряда*. В этом соотношении, по форме аналогичном первому началу термодинамики, особый интерес представляет первое слагаемое, т.е. частное приращение

$$\delta M = (\theta/8\pi) \delta A,$$

где δA – приращение площади горизонта событий, θ – поверхностный гравитационный заряд ЧД. Это слагаемое можно сопоставить “тепловому” слагаемому $\delta Q = T\delta S$ в обычной форме первого начала, где T – температура, а δS – приращение энтропии обычного объекта⁸. Оказывается, что площадь A горизонта событий (неквантовой) ЧД обладает тем же свойством, что и энтропия S – она никогда не уменьшается в процессе эволюции, в том числе – при

⁸ Температура излучения Хокинга $T_H = (\hbar/2\pi ck)\theta$ совпадает с температурой Унру $T_U = (\hbar/2\pi ck)a$, где a – эффективное ускорение, создаваемое полем поверхностного гравитационного заряда. Иными словами, именно этим зарядом определяется напряженность гравитационного поля.

слиянии нескольких ЧД (теорема Хокинга)⁹. Таким образом, эволюция ЧД носит в общем случае необратимый характер, т.е. доля внутренней энергии, которую нельзя из нее извлечь, возрастает со временем. Более того, возрастает (или не убывает) со временем и суммарная энтропия ЧД и ее окружения (обобщенный второй закон термодинамики Бекенштейна).

С другой стороны, множитель перед δA , пропорциональный *поверхностному гравитационному заряду*, играет роль эффективной температуры T . Последняя характеризует процесс “теплового” излучения ЧД вследствие квантовых эффектов вблизи горизонта событий. Эта температура оказывается *обратно пропорциональной массе* ЧД, поэтому они (как звезды и другие сильно гравитирующие объекты) обладают *отрицательной* теплоемкостью.

3.6. Что происходит внутри черной дыры?

Вообразим смельчака, приближающегося на ракете к далекой черной дыре. Земным наблюдателям будет казаться, что по мере приближения к ЧД время для него будет замедляться до бесконечности, так что по земным часам он никогда не пересечет горизонт событий ЧД. Посылаемый им на Землю световой сигнал с точки зрения земного наблюдателя будет испытывать все более сильное (в пределе – бесконечное) “синее” смещение. Однако по собственным часам ракеты он пересечет горизонт событий ЧД за конечное время и, пока его не разорвет на части продольный градиент приливной силы, казалось бы, сможет наблюдать внутреннюю область дыры.

Первые попытки теоретически описать то, что происходит внутри черной дыры Шварцшильда, относятся к концу 70-х годов. Представление о ЧД как о мембране, абсолютно справедливое для *внешнего* наблюдателя, в современной общей теории относительности (ОТО) считается непригодным для наблюдателя, проникающего в ЧД через ее горизонт событий, т. е. для *внутреннего* наблюдателя.

При этом ОТО исходит из решений уравнений Эйнштейна, *продолженных* внутрь черной дыры. Популярное описание различных известных решений можно найти в [Kaufman, 1977], где обсуждаются крайне экзотические их особенности – интригующая внутренняя структура ЧД, центральная сингулярность, связь с бесконечно удаленными во времени состояниями нашей Вселенной и даже с другими вселенными.

Все эти решения принципиально основываются на сохранении в произвольной *внутренней* точке ЧД *зависимости решения от расстояния до ее центра*. Вследствие этого возникают некоторые фундаментальные проблемы (см. [Новиков и Фролов, 2001]). Во-первых, в решении обязательно возникает начальная сингулярность внутри черной дыры (это отчасти напоминает сингулярность для гравитационного или электростатического потенциала точечного заряда в классической физике):

Вблизи от этой сингулярности, где кривизна пространства-времени приближается к планковской величине, общая теория относительности неприменима... , поэтому обсуждение физики в этой области было бы в высшей степени умозрительным [Новиков и Фролов, 2001].

Во-вторых, возникают парадоксы, связанные с направлением течения времени и причинностью. Оказывается, например, что:

... положение горизонта [событий] и его расширение *до* пересечения с [падающей на ЧД тонкой материальной] оболочкой зависят от событий в будущем (коллапса массивной оболочки)... Это поведение выглядит так, как если бы мембрана дыры жила во времени, которое течет в противоположном направлении: из будущего в прошлое.

⁹ Отметим, что энтропия, например, Солнца на 20 порядков меньше, чем энтропия черной дыры с такой же массой. Этот факт объясняют тем, что при образовании черной дыры вся информация о ее структуре полностью утрачивается внешним наблюдателем (см. [Bekenstein, 2003]).

... внутренняя структура типичной вращающейся черной дыры ... решающим образом зависит от условий на горизонте событий в очень удаленном будущем внешнего наблюдателя, ... например, от конечного состояния испарения черной дыры, от возможных столкновений черной дыры с другими черными дырами и от судьбы самой Вселенной. Ясно, что теоретики чувствуют себя весьма неуютно в таких обстоятельствах... [Новиков и Фролов, 2001].

3.7. Новый подход для области внутри ЧД

Указанные проблемы, с моей точки зрения, обусловлены *неверной посылкой* о том, что внутреннее решение для ЧД является продолжением внешнего решения.

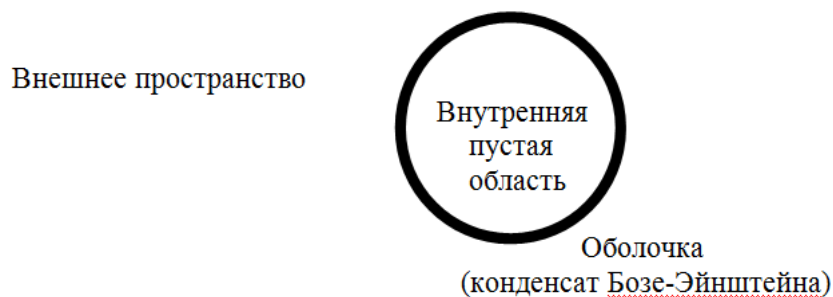


Рисунок 3.5. “Гравастар”.

Отказ от такой стандартной концепции внутренней структуры ЧД и новое решение для конечной точки гравитационного коллапса были предложены, например, в работе [Mazur and Mottola, 2002]. В ней предлагается модель ЧД с не содержащей материи обычной внешней областью, однако вместо поверхности горизонта событий вводится граничная область, содержащая конденсат Бозе-Эйнштейна и обладающая малой, но конечной толщиной (не более, чем на несколько порядков превышает планковскую длину). Наконец, внутренняя область ЧД представляет собой пустое пространство-время де Ситтера.

Новое решение не имеет ни сингулярностей, ни горизонтов событий, и характеризуется единым глобальным временем. Энтропия граничной фазы соответствует стандартной гидродинамической энтропии, так что информационный парадокс также исчезает. В отличие от черных дыр, коллапсирующая звезда такого типа (авторы предложили для нее название “гравастар”, см. рис. 3.5) термодинамически устойчива.

Данная модель очень близка к представлению о мембране для внешнего наблюдателя. С другой стороны, она опирается на картину фазового перехода обычной материи в конденсат Бозе-Эйнштейна, которая в данном случае содержит достаточно много допущений, а фигурирующая в модели оболочка имеет хоть и очень малую (близкую к “планковской”), но все же конечную толщину.

Мое собственное исследование (см. раздел 3.3, а также [Шульман, 2007a]), основанное на известных результатах ОТО, выявило не менее интригующую картину того, что происходит при образовании черной дыры с объектом конечных размеров (т.е. не точечного). Если в режиме, далеко от коллапса, распределение давления внутри объекта положительно и монотонно убывает от центра шара к его границе, то при приближении к режиму коллапса в его центре возникает *точка разрыва давления*, которая постепенно вытесняется к его границе. По обе стороны этой точки давление бесконечно по величине, но имеет разные знаки.

Это побудило меня предложить еще более радикальную концепцию для описания ЧД в нашей Вселенной, которая также может послужить основой для объяснения свойств самой Вселенной. Данная концепция предполагает, что мембранная оболочка *действительно возникает* на горизонте событий ЧД, но в результате гравитационного коллапса там происходит *изменение топологии* пространства – само физическое пространство исчезает, как таковое, внутри ЧД, а *граница между внешней и внутренней областями приобретает*

размерность, на единицу меньшую чем размерность внешнего пространства (т.е. в данном случае граница будет двумерной).

При таком подходе представление о двумерности граничной мембраны оказывается не приближенным, а абсолютно точным. Вся масса черной дыры окажется сосредоточенной в этой двумерной области¹⁰ вполне однородным образом, поскольку различий, зависящих от удаленности относительно центра, не будет. Становится также понятным, почему энтропия в окружающей *внешней* среде в среднем пропорциональна *объему* элемента среды, а в мембране – *площади* элемента поверхности мембраны.

3.8. Наша Вселенная в роли ЧД во внешней супер-вселенной

Согласно моей точке зрения, в момент гравитационного коллапса происходит понижение на единицу размерности граничной области, а внутри ЧД нет вообще ничего (ни пространства де Ситтера, ни какого либо иного пространства в физическом и математическом понимании этого термина). При дальнейшем поглощении материи и энергии поверхность горизонта событий *растет*. Эта *поверхность растет быстрее массы ЧД*, так что плотность поверхностного гравитационного заряда уменьшается.

С точки зрения гипотетического 2-мерного наблюдателя, находящегося на этой поверхности, его 2-мерная вселенная растет, причем реальной мерой изменчивости этого мира будет изменчивость полной массы и, соответственно, его радиуса кривизны. Если такой наблюдатель располагает способом сравнивать радиус кривизны с некоторым фиксированным эталоном, то он может *определить в качестве меры изменчивости своей вселенной величину – интервал параметрического времени, пропорциональный приращению ее радиуса*. Добавим, что для этого наблюдателя в его вселенной не будет выполняться закон сохранения энергии (полная масса и энергия непрерывно растут).

Сравнивая с этой ситуацией поведение нашей собственной Вселенной, мы, прежде всего, обращаем внимание на то, что она также расширяется. В 1993 году, размышляя над идеями Н.А. Козырева о ходе времени, я пришел к концепции Вселенной в виде сферической 3-мерной оболочки 4-мерного евклидова шара ([Шульман, 20076]). Увеличивающийся радиус шара я отождествил с возрастом Вселенной, придав ему простой и ясный смысл *параметрического времени*. Скорость света в такой модели обрела статус эмпирически определенного коэффициента для перехода от измерения длины вдоль 3-мерной *поверхности* шара к измерению длины вдоль *нормали* к этой поверхности. С другой стороны, статус скорости света как *предельно возможной скорости* простым образом отвечает предельному углу (90°) возможного наклона 4-мерной мировой линии движения тела относительно пространственного сечения Вселенной, т.е. 3-мерной сферической поверхности. Такая модель может быть выведена из предположения, что *наша Вселенная является 3-мерной черной дырой, т.е. 3-мерной мембраной – горизонтом событий, отделяющим некоторую внутреннюю 4-мерную область от 4-мерного окружающего пространства*.

3.9. Формализм ТШРВ

Математически формализм предлагаемой мной теорией шаровой расширяющейся Вселенной (ТШРВ) основан на тех же общерелятивистских уравнениях Эйнштейна – Фридмана, что и стандартная космологическая модель (СКМ). Выпишем их снова:

$$k \cdot (c/R)^2 + (\dot{R}/R)^2 + 2(\ddot{R}/R) = -8 \cdot \pi G \cdot P/c^2$$

$$k \cdot (c/R)^2 + (\dot{R}/R)^2 = 8 \cdot \pi G \cdot \rho/3,$$

¹⁰ В качестве аналогии рассмотрим зависимость от центра для потенциала электрически заряженного шара в классической физике. Вне шара поле совпадает с полем эквивалентного точечного заряда. В то же время поле внутри шара зависит от того, как расположены заряды в шаре – если распределены только на его поверхности, то поле внутри шара будет равно нулю.

где G - постоянная в законе всемирного тяготения Ньютона, c - скорость света, ρ - плотность, P - давление, $k = 0, 1$ или -1 в зависимости от знака кривизны. Здесь символы $\dot{R}$ и $\ddot{R}$ обозначают первую и вторую производную R по времени соответственно.

Однако при *решении* этих уравнений мы теперь вводим два принципиальных *отличия*. Во-первых, *поскольку Вселенная заполнена материей* (с некоторой, хотя бы и очень малой, плотностью ρ), мы, в соответствии с выводами раздела 3.3, не будем полагать статическое давление материи P тождественно равным нулю, а будем искать его в процессе решения уравнений. Во-вторых, мы также отказываемся считать неизменной (а значит, заданной) глобальную энергию Вселенной в процессе ее эволюции, поскольку рассматриваем Вселенную как черную дыру, поглощающую энергию и материю извне. Поэтому и закон эволюции энергии мы будем искать, решая указанную систему уравнений.

При этом нам требуется заменить допущение о сохранении во времени массы вещества и энергии во Вселенной какой-то другой гипотезой. Такую гипотезу легко сформулировать, исходя из представления о том, что время нашей Вселенной есть не что иное, как “метаболическое время” черной дыры, которую она собой представляет, т.е. *строго пропорционально ее размеру*¹¹! Поэтому мы положим $\ddot{R}=0$, тем самым исключив возможность нелинейного изменения размера Вселенной. Оказывается, что в этом случае возникают новые замечательные решения. Действительно, получаем уравнение для определения давления P в виде:

$$k(c/R)^2 + (\dot{R}/R)^2 = -8\pi GP/c^2$$

а также обычное уравнение связи между давлением P и плотностью ρ :

$$P = -\rho c^2/3$$

Сводка решений уравнения ЭФ при $\ddot{R} = 0$ приведена ниже в таблице.

$\dot{R}$	k	Решаемое уравнение	ρ	P
0	0	$0 + 0 = -8\pi GP/c^2$	0	0
	1	$(c/R)^2 + 0 = -8\pi GP/c^2$	$+3c^2/(8\pi GR^2)$	$-c^4/(8\pi GR^2)$
	-1	$-(c/R)^2 + 0 = -8\pi GP/c^2$	$-3c^2/(8\pi GR^2)$	$+c^4/(8\pi GR^2)$
$\pm c$	0	$0 + (\pm c/R)^2 = -8\pi GP/c^2$	$+3c^2/(8\pi GR^2)$	$-c^4/(8\pi GR^2)$
	1	$(c/R)^2 + (\pm c/R)^2 = -8\pi GP/c^2$	$+3c^2/(4\pi GR^2)$	$-c^4/(4\pi GR^2)$
	-1	$-(c/R)^2 + (\pm c/R)^2 = -8\pi GP/c^2$	0	0

Решение для стационарного случая $\dot{R} = 0$, $\ddot{R} = 0$, $k = 1$ первоначально и рассматривал Эйнштейн. Поскольку он-то не учитывал статического давления материи, то ему пришлось искусственно ввести космологическую постоянную (иначе решение вообще отсутствует). В дальнейшем вопрос об этой величине и ее физическом смысле повис в воздухе и считается открытым вплоть до настоящего времени. Таковы издержки методологической традиции.

Мы же для этого стационарного случая находим связь между давлением и радиусом кривизны:

$$\rho = 3c^2/(8\pi GR^2)$$

Второе замечательное решение возникает (при $k = 1$), если принять условия $\dot{R} = c$, $\ddot{R} = 0$, согласно которым радиус кривизны растет строго пропорционально времени. Это решение имеет фундаментальную физическую интерпретацию, смысл которой состоит в том, что

¹¹ С точки зрения материнской вселенной, метаболическое время черной дыры растет только в те периоды, когда ее масса увеличивается.

процесс расширения Вселенной и представляет собой само течение времени, что нет никаких иных “маркеров” возраста Вселенной, кроме ее текущего размера.

Подставив данные условия в приведенные выше уравнения Эйнштейна, найдем:

$$\begin{aligned} 2(c/R)^2 &= -8\pi GP/c^2 \\ 2(c/R)^2 &= 8\pi G\rho/3 \end{aligned}$$

при этом коэффициент связи между давлением и радиусом кривизны по сравнению со стационарной моделью *отличается в два раза*. В обоих случаях, однако, соотношение между давлением и плотностью (уравнение состояния) имеет одинаковый вид ($P = -\rho c^2/3$).

Следует отметить, что это в второе решение время в явном виде вообще не входит, что и подтверждает описанную выше его интерпретацию. Далее, линейная зависимость радиуса кривизны от времени, будучи постулированной, не должна теперь выводиться из полученных соотношений; этот же постулат делает ее физически не зависящей (во времени) от плотности материи. Отсюда следует вывод, противоречащий принятой традиции решения уравнений поля, но полностью отвечающий самому духу эйнштейновского подхода, направленного на геометризацию физики. Он состоит в том, чтобы из найденных выражений искать плотность и давление материи в виде зависимостей от кривизны пространства, а не наоборот:

$$\begin{aligned} \rho &= 3c^2 / (4\pi GR^2) \\ P &= -c^4 / (4\pi GR^2) \end{aligned}$$

На языке физики это означает, что плотность и давление материи суть просто данные нам в ощущениях (измерениях) характеристики кривизны пространства, т.е. что они являются вторичными, зависимыми от нее величинами. Добавим, что этот путь, в сущности, обозначил сам Эйнштейн, введя замкнутую на себя Вселенную, т.е. заменив задание фиксированных условий на границах условием самосогласованности решения!

Тогда из обычных космологических уравнений Эйнштейна – Фридмана для модели эволюции Вселенной в параметрическом времени давление и энергия находятся уже как решение этих уравнений. Это решение, как и должно быть, определяет (отрицательное) давление функцией, в точности отвечающей величине гравитационной энергии и массе Вселенной, которая изменяется во времени линейно. Такое решение позволяет объяснить очень многие космологические характеристики наблюдаемой Вселенной.

В частности, становится ясным физический смысл Большого Взрыва – он оказывается началом гравитационного коллапса¹² некоторого объекта, наблюдаемым “изнутри”, т.е. наблюдателем из 3-мерной мембраны. Возраст этой мембраны строго пропорционален ее текущему 3-мерному радиусу. *Масса каждого объекта (как и масса всей Вселенной) растет линейно во времени и, таким образом, неожиданно и своеобразно оказывается справедливым тезис Н.А. Козырева о преобразовании времени в энергию.*

На рис. 3.6 показаны ([Шульман и Рэффел, 2008]) безразмерные зависимости масштабного фактора Вселенной от ее возраста для различных моделей эволюции: красная линия соответствует ТШРВ (SEUT), тогда как зеленая и синяя кривые – двум версиям СКМ. При этом синяя кривая отвечает ненулевой космологической постоянной, численное значение подобрано космологами из соображения наилучшего совпадения с данными наблюдений. Заметим, что введение космологической постоянной заведомо определяет *нелинейную* эволюцию синей кривой.

¹²Как было отмечено выше, аналогичная гипотеза со ссылкой на Дж. Уилера приводится в публикации [Smolin, 1994].

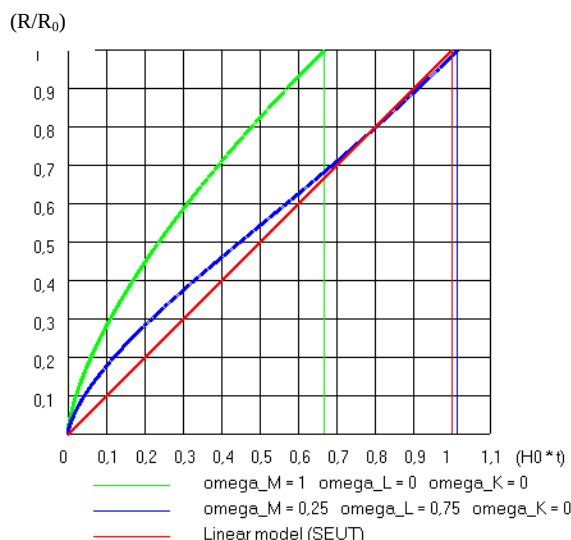


Рисунок 3.6. Изменение размера Вселенной с возрастом

Поскольку новое решение получено для случая $\dot{R} = c$, то параметр Хаббла оказывается обратно пропорциональным радиусу и возрасту Вселенной. Существенное отличие этого решения от похожего решения Фридмана состоит в том, что оно отвечает положительной кривизне 4-сферы, а не плоской метрике, но при этом плотность *всегда* равна $3H^2/(4\pi G)$, что соответствует $2\rho_0$ (ср. с замечанием Вейнберга¹³). Соответственно, и масса Вселенной, равная произведению средней плотности на ее объем, оказывается не постоянной во времени, а пропорциональной радиусу кривизны и времени.

Как известно, закон сохранения энергии однозначным образом соответствует такому чисто "геометрическому" свойству Вселенной, как однородность времени, т.е. независимость в общем случае характеристик течения физического процесса от того, когда именно он был начат - вчера, сто лет или сто миллиардов лет назад. Такое соответствие обусловлено отсутствием в аналитическом формализме явной зависимости от времени функции Лагранжа для замкнутой физической системы, т.е. равенством нулю ее частной производной по времени.

Оставаясь в рамках классической механики, мы уже можем усомниться в том, что течение всех без исключения физических процессов не зависит от кривизны той области пространства, в которых эти процессы протекают. Напомним, что основные уравнения Лагранжа выводятся из вариационного принципа, согласно которому реальная траектория в пространстве обеспечивает наименьшее значение специального функционала - действия. Если кривизна пространства меняется с течением времени, то выбор начального и конечного момента варьирования принципиально влияет уже на само множество и характер варьируемых траекторий, что в общем случае исключает независимость результата от этого выбора, т.е. тезис об однородности времени. Когда же мы переходим к релятивистской механике, мы непосредственно сталкиваемся с тем, что от радиуса кривизны Вселенной зависит фундаментальный метрический тензор, определяющий параметры механического движения. Более того, от величины этого радиуса, т.е. от возраста Вселенной, могут зависеть и другие фундаментальные величины, например – постоянная Планка (см. [Шульман, 2004]).

Вообще, когда речь заходит о распространении закона сохранения энергии на общую теорию относительности, то делается это скорее в силу традиции, чем исходя из строгого обоснования. Это приводит к известным логическим трудностям, по поводу которых у физиков

¹³ В §2 главы 15 известной монографии [Weinberg, 1972] ее автор пишет, что если верить полученным из наблюдений значениям "параметра замедления" и постоянной Хаббла, то с необходимостью получается, что плотность Вселенной около $2\rho_{кр}$.

имеются различные мнения (см., например, [Логунов, 1988]) и на которых мы здесь останавливаться не станем.

В действительности именно уравнения Эйнштейна и отражаемая ими объективная физическая реальность должны использоваться в качестве отправного момента теории, приводя к обобщению теоремы Нётер. В правильной теории найденная путем решения этих уравнений зависимость средней плотности материи и всей массы Вселенной от времени должна приводить к точному или приближенному выполнению закона сохранения массы и энергии, а не наоборот. Так и обстоит дело в действительности, и данное обстоятельство не только проясняет проблему сохранения энергии во Вселенной, но и помогает выйти на правильные исходные позиции при анализе такого объективно существующего феномена, как направленность (“стрела”) времени.

В силу сказанного выше космологическая теория “большого взрыва” должна быть заменена моделью “энергетического насоса”. Проблемы, связанные с начальной сингулярностью, во многом теряют свою остроту, поскольку начальные значения массы и энергии в нашей модели также равны нулю.

Исходя из астрофизических наблюдений, Н.А.Козырев [Козырев, 1991] высказывал утверждение о единстве механизма излучения звезд, основанного на “превращении” времени в энергию. Согласно нашей модели относительное приращение массы и энергии покоя звезды равно относительному приращению времени существования Вселенной: $\Delta m/m = \Delta E/E = \Delta t / t$. Отсюда следует, что дополнительная энергия может обусловить мощность излучения на единицу массы звезды, пропорциональную постоянной Хаббла (в нашей модели эта постоянная равна $H = 1/t$):

$$\Delta E/(\Delta t \cdot m) \leq c^2 H$$

Так, для Солнца относительное уменьшение массы за счет излучения в год составляет до 10^{-13} , тогда как текущий возраст Вселенной обеспечивает удельный прирост массы до 10^{-10} . Интересно отметить, что при массе Солнца порядка 10^{30} кг ежегодный прирост массы в 10^{18} кг составляет в относительном выражении примерно 10^{-12} . Близкий по величине прирост массы необходим для объяснения наблюдаемого (и пока никем не объясненного¹⁴) ежегодного увеличения расстояния между Землей и Солнцем на 15 см.

Далее на основе вновь полученных решений мы сравним предсказания ТШРВ с реально имеющимися данными астрофизических наблюдений, обсудим ряд важных астрофизических тем.

3.10. Проблема космологической постоянной

Как мы уже знаем, космологическая постоянная Λ – плод усилий Эйнштейна по спасению решения для статической модели Вселенной. В дальнейшем этот параметр был повторно введен “руками” уже в нестационарные модели, чтобы “подогнать” СКМ под результаты экспериментального определения космологических параметров. Однако при этом возникли две новые фундаментальные проблемы, удовлетворительного решения которых физиками так и не найдено.

Первая проблема – найти физическое объяснение для формального введения космологической константы Λ в уравнения ЭФ. Предлагается отождествить “темную энергию”, отвечающую Λ , с энергией физических колебаний вакуума. Однако (см., например, [Кладдор-Клайнгротхаус, Цюбер, 2000]) астрофизические наблюдения дают для указанной гипотетической плотности вакуума значение порядка 10^{-30} г/см³, в то время как квантово-механические вычисления приводят к оценке порядка 10^{92} г/см³, т.е. расхождение оказывается неимоверно большим – 122 порядка! Однако есть и еще более сильный, с моей точки зрения, довод: *энергия “нулевых” колебаний вакуума не может быть извлечена и использована ни для гравитационного расширения Вселенной, ни для чего бы то ни было еще, поскольку отвечает состоянию с наименьшей возможной энергией.*

¹⁴ arXiv:0907.2469v1 [gr-qc] 14 Jul 2009. J. Anderson et al. Astrometric Solar-System Anomalies.

Вторая проблема, “которая часто оставляется без внимания”¹⁵, но имеет едва ли не большее значение, состоит вот в чем. При введении в уравнения ЭФ космологической постоянной Λ в ней тем самым задается определенная шкала расстояния $R = (\Lambda/3)^{-1/2}$. Поскольку в настоящую эпоху $\Lambda = 10^{-56} \text{ см}^{-2}$, то R можно идентифицировать с современным размером Вселенной (10^{28} см). Но размер Вселенной менялся и меняется с течением времени, а величина Λ полагается (во всяком случае, при “подгонке” космологической модели к астрофизическим данным) неизменной. Спрашивается, какой физический смысл имеет величина $(\Lambda/3)^{-1/2}$?

Обе проблемы легко снимаются в рамках предлагаемого нами подхода. Никакой константы Λ вообще в уравнения вводить не требуется, нужный эффект достигается автоматически за счет учета статического давления материи P и связанной с ним объемной энергии гравитации (а не колебаний вакуума!). При этом легко объясняется и вышеуказанная связь между *гипотетической величиной* Λ и *текущим* размером Вселенной R . Действительно, в космологических уравнениях эта (ненужная) гипотетическая величина Λ равна $8 \cdot \pi \cdot G \cdot \rho$ (при скорости света $c = 1$). Найденное нами *новое* решение космологических уравнений (при $c = 1$) дает для плотности ρ :

$$\rho = 3 / (4 \cdot \pi \cdot G \cdot R^2)$$

Из этого следует

$$\Lambda = 8 \cdot \pi \cdot G \cdot 3 / (4 \cdot \pi \cdot G \cdot R^2) = 6/R^2$$

т.е.

$$R = (\Lambda / 6)^{-1/2}.$$

3.11. О замкнутости Вселенной

Как уже было отмечено в разделе 2.11 (в сноске), Эйнштейн нашел для своей первоначальной стационарной модели, что

$$R = (2M \cdot G) / (c^2 \pi) = R_G / \pi,$$

где M – масса Вселенной, G – гравитационная постоянная Ньютона, c – скорость света; при таком подсчете R оказывается в π раз меньше так называемого “гравитационного радиуса” Вселенной.

С другой стороны, выразив массу нашей Вселенной $M = \rho \cdot V$ через (найденную нами в качестве нового решения) среднюю плотность $\rho = 3 \cdot c^2 / (4 \cdot \pi \cdot G \cdot R^2)$ и объем 3-мерного неевклидова шара $V = 2 \cdot \pi^2 \cdot R^3$, непосредственно получим оценку примерно того же порядка

$$R = 2 \cdot M \cdot G / (3 \cdot \pi \cdot c^2) = R_G / (3\pi)$$

То обстоятельство, что при ничтожной плотности вещества геометрический радиус оказывается меньше гравитационного (и, следовательно, сама Вселенная - “черной дырой”), объясняется, как выше говорилось, следующим простым соображением: при заданной плотности и сферической форме гравитационный радиус пропорционален массе объекта, а геометрический - всего лишь кубическому корню из массы. Выполнение условия $R < R_G$ в обоих случаях согласуется со сделанным при расчете допущением о замкнутости Вселенной, отсутствием у нее границ при конечном объеме, т.е. подтверждает предположение о том, что область локализации энергии покоя материи Вселенной не превышает области, в которой действует гравитация.

¹⁵ Автор обзора [Буссо, 2007] пишет (перевод мой – М.Х.Ш.): “Современное значение космологической константы не соответствует ее значению для ранней Вселенной. Это одна из наиболее значительных трудностей в проблеме космологической константы, которая часто оставляется без внимания”

Таким образом, и теоретический анализ, и основанные на реальных данных оценки (см. раздел 3.1) подтверждают тот факт, что геометрический размер нашей Вселенной действительно не превосходит ее гравитационного радиуса.

3.12. Проблемы “горизонта” и “плоскостности” Вселенной

В стандартной космологической модели (СКМ) известна проблема “горизонта”, связанная с глобальной пространственной однородностью Вселенной ([Сажин, 2002]). Однородность обычно объясняется с помощью гипотезы о существовании фазы инфляции, т.е. сверхбыстрого расширения Вселенной на ранних стадиях ее существования. В то же время, как отмечено в [Вессон, 2003], не ясно, объясняет ли это также однородность свойств массивных частиц, которая была выявлена спектроскопией удаленных астрономических источников, например - квазаров. Между тем, в рамках нашей модели размер Вселенной со временем растет строго линейно, поэтому скорость удаления горизонта в точности совпадает со скоростью расширения Вселенной, так что данной проблемы просто не возникает.

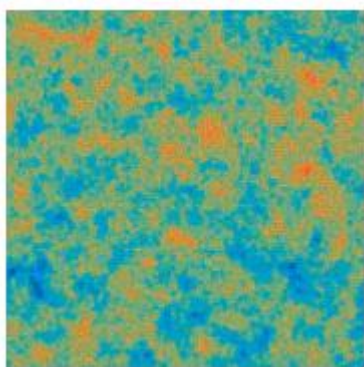


Рисунок 3.7 ([Wayne Hu, 2008])
Фрагмент карты
температурных флуктуаций

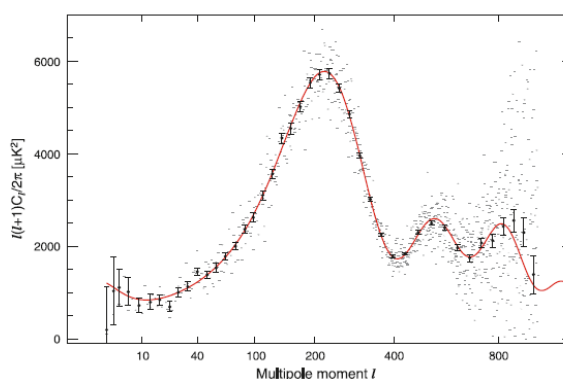


Рисунок 3.8 ([Dunkley et al., 2008]).

Спектр мощности температурных флуктуаций

Известно также, что СКМ объясняет расположение наиболее высокого корреляционного пика температурных флуктуаций космического микроволнового фонового излучения (СМБР) при $l \approx 200$ (соответствует угловому размеру порядка 1°), используя представление о плоской пространственной геометрии Вселенной. На рис. 3.7 приведен фрагмент карты таких флуктуаций, на рис. 3.8 – полный спектр мощности температурных флуктуаций СМБР.

Рассмотрим, как получается в СКМ нужное значение угла и соответствующее значение l (см. [Bersanelli et al., 2002], [Dunkley et al., 2008], [Santleben et al., 2008], [Spergel et al., 2003], [Wayne Hu and Dodelson, 2002], [Wayne Hu, 2008], [Постнов]). Логика расчета принимается следующей:

- Угловой размер наблюдаемой современным наблюдателем некоторой области небосвода определяется путем вычисления тангенса угла, т.е. отношения размера этой области к пути, пройденному фотонами от нее до наблюдателя. Если это отношение достаточно мало, то оно приблизительно равно самому углу, выраженному в радианах.
- Размер s_r нужной области вычисляется на основе довольно сложной физической модели процессов, происходящих от момента Большого Взрыва $t=0$ вплоть до эпохи последнего рассеяния t_r (т.е. в диапазоне от $z=\infty$ до $z_r=1.1 \cdot 10^3$). Речь идет о *первой* гармонике флуктуаций температуры, поэтому подразумевается, что по порядку величины размер s_r просто равен размеру Вселенной в эпоху последнего рассеяния, т.е. при $t=t_r$.
- Путь $c\Delta t$, пройденный фотонами, пропорционален времени расширения Вселенной от эпохи последнего рассеяния ($t=t_r$, $z=z_r$) до современной эпохи ($t=t_0$, $z=0$). Пренебрегая

временем, прошедшим от Большого Взрыва (при $z=\infty$) до эпохи последнего рассеяния (при $z=z_r$), можно считать, что $c\Delta t \approx ct_0$.

- В действительности в данном случае следует использовать не метрическое расстояние $d_M = c\Delta t$, а угловое расстояние $d_A = d_M/(1+z)$, которое учитывает расширение Вселенной за время между испусканием фотонов объектом и регистрацией фотонов наблюдателем. Поэтому рассчитанный угол необходимо умножить еще на множитель $(1+z)$:

$$\begin{aligned}\Theta &= (s_r/\sqrt{3})/d_M = (1+z) ct_r / (\sqrt{3}c\Delta t) \approx \\ &\approx (1.1 \cdot 10^3 \cdot 3.3 \cdot 10^5) / (1.7 \cdot 13.7 \cdot 10^9) = \\ &= (3.6/2.4) \cdot 10^{-2} = 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ рад} = 0.9^\circ\end{aligned}$$

(здесь коэффициент $\sqrt{3}$ обусловлен соотношением между амплитудами флуктуации гравитационного потенциала и флуктуации температуры.) Соответствующий мультипольный момент имеет номер $\ell = 180^\circ/0.9^\circ = 200$.

Использование в качестве метрического (координатного) расстояния $c\Delta t$ допустимо лишь в случае плоской¹⁶ Вселенной. В свою очередь, плоская метрика в СКМ подразумевает, что в уравнениях Эйнштейна – Фридмана для плотности материи ρ следует использовать так называемое критическое значение ρ_0 . И, наконец, как хорошо известно, в СКМ именно от соотношения между ρ и ρ_0 зависит не только тип *пространственной* метрики, но и характер эволюции Вселенной *во времени*.

Выше мы воспроизвели логику рассуждений СКМ, приводящей ее к выводу о плоской геометрии Вселенной и, вследствие этого, к соотношению $\rho = \rho_0$. Однако существует метод вычисления положения максимального пика спектра мощности температурных флуктуаций CMBR, никак не связанный с гипотезой о характере *пространственной метрики* Вселенной. Он весьма прост, его суть состоит в следующем: в эпоху последнего рассеяния звуковой горизонт полностью окружал воображаемого наблюдателя по всему периметру. За время, прошедшее с тех пор, длина волны ($\sim s_r$) основной гармоник колебаний не изменилась, тогда как размер Вселенной возрос в $(z+1)$ раз. Следовательно, во столько же раз увеличилась кратность этой гармоник для современного наблюдателя. Более точно, с учетом сделанного выше замечания, коэффициент пересчета равен $(z_r+1)/\sqrt{3}$. Это при $z=1100$ дает угол $\theta \approx 0.6^\circ$, что в точности соответствует данным наблюдений¹⁷.

Выше, на рис. 3.6, был приведен закон изменения масштабного фактора (т.е. относительного размера) Вселенной в функции безразмерного возраста $H_0 t$ (где H_0 – параметр Хаббла в настоящую эпоху) для различных космологических моделей ([Шульман и Рэффел, 2008]). Красная линия соответствует линейному закону эволюции (ТШРВ), при котором масштабный фактор строго растет пропорционально возрасту Вселенной. Синяя же кривая соответствует принятой в СКМ так называемой Λ CDM-модели ($\Omega_M = 0.25$, $\Omega_L = 0.75$, $\Omega_k = 0$). На основе подбора “наилучших” значений параметров Ω_M , Ω_L и Ω_k для такой зависимости СКМ, как мы отметили выше, приходит к заключению, что в настоящую эпоху Вселенная *расширяется с ускорением*. Но с точки зрения ТШРВ дело обстоит по-другому: просто параметры синей кривой подобраны так, что она проходит через ту же самую конечную точку, что и красная линия. Последняя, напротив, предусматривает строго постоянный темп расширения Вселенной.

Из сказанного в настоящем разделе следует, что положение максимального пика спектра CMBR вовсе не является убедительным доказательством плоскостности геометрии Вселенной и выполнения условия $\rho = \rho_0$.

¹⁶ В ином случае, как известно, расстояние становится аргументом обычного синуса для замкнутой на себя пространственной геометрии, или гиперболического синуса для открытой пространственной геометрии Вселенной.

¹⁷ В позднейшем отчете по проекту WMAP [Komatsu et al., 2010] указано значение $\theta = 0.6^\circ$, *совпадающее* с нашим результатом.

3.13. Начальный пик спектра мощности флуктуаций температуры космического фонового излучения

Найденное нами новое решение позволило предсказать еще один возможный феномен (см. [Шульман и Рэффел, 2008]). Оказывается, самые “старые” реликтовые фотоны за 13,7 млрд. лет расширения Вселенной успевают совершить “кругосветное” путешествие и снова появиться в той части небосвода, в которой мы могли бы их видеть в раннюю эпоху существования Вселенной, если бы мы и Земля тогда существовали. Указанный феномен может объяснить некоторые особенности автокорреляционного спектра мощности флуктуаций температуры реликтового излучения.

В модели ТШРВ физически неподвижным телам соответствует “дрейф” точки 3-мерной поверхности (Вселенной) вдоль 4-мерного радиуса расширяющегося шара. При этом 3-мерные пространственные расстояния между различными “неподвижными” точками возрастают в точности по закону Хаббла, а угол Θ между отвечающими им 4-радиусами остается постоянным.

Когда же речь идет о движущихся телах, то при расширении Вселенной наряду с возрастанием 4-радиуса изменяется и указанный угол Θ . В предельном случае движения со скоростью света изображающая точка – при возрастании радиуса r на величину dr – также возрастает на величину dr и поэтому смещается на угол $d\Theta = dr/r$ (см. рис. 3.9). Интегрируя, находим, что при возрастании радиуса Вселенной от значения r_1 до r_2 фотон, движущийся со скоростью света, перемещается на угол

$$\Theta = \ln(r_2/r_1)$$

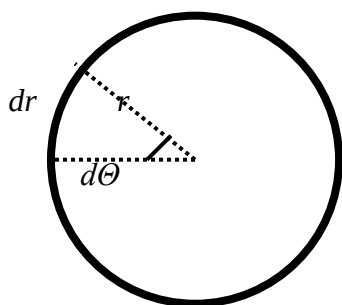


Рисунок 3.9

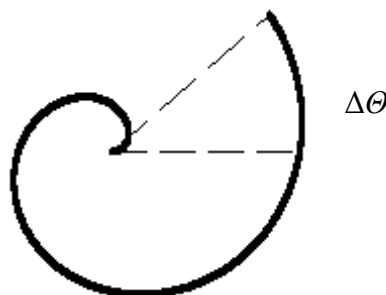


Рисунок 3.10

Остается выяснить, какова реальная величина Θ , соответствующая текущему возрасту Вселенной 13.7 млрд. лет и моменту, начиная с которого фотоны смогли свободно путешествовать. Учитывая, что “поверхности последнего рассеяния” отвечает красное смещение $z \sim 1100$, найдем, что $\ln(r_2/r_1) = 7.00$, так что “перекрытие” по (возрастающему) периметру Вселенной оказывается равным (см. рис. 3.10):

$$\Delta\Theta = 7.00 - 6.28 = 0.72 \text{ (рад),}$$

или примерно 41° . Иными словами, наиболее “старые” свободно путешествующие по Вселенной фотоны, подобно Магеллану, возвращаются к нам с противоположной стороны небосвода (это эквивалентно дополнительной интенсивности потока фотонов в соответствующих точках небосвода).

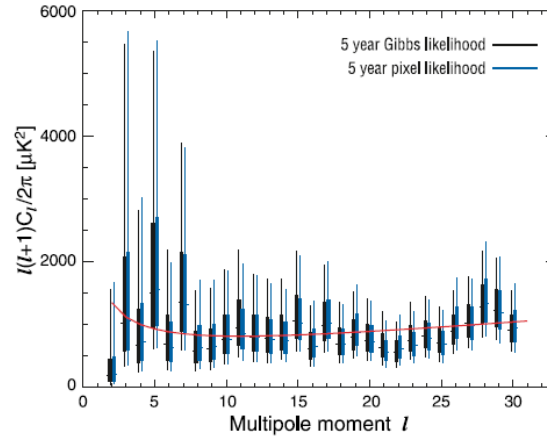


Рисунок 3.11 [Dunkley et al., 2008]

Можно ли проверить существование такого эффекта? Современная астрофизика располагает экспериментально полученным автокорреляционным спектром температуры реликтового излучения (см. данные космического зонда WMAP на рис. 3.8). Он показывает степень корреляции между температурой различных участков небосвода в зависимости от размера этих участков. Точнее, аргументом этой функции является мультипольный момент с номером $\ell = \pi/\theta$, где θ – угловой размер участка. Наибольшему пику зависимости на рис. 3.8 соответствует $\ell \sim 200$, т.е. угловой размер поверхности последнего рассеяния порядка 0.6° , “видимый” в настоящую эпоху.

Как было отмечено, угловое перекрытие для старейших фотонов $\Delta\theta$ составляет до 0.72 рад (41°). Такому угловому размеру должен соответствовать мультипольный момент $\ell \sim 3.14/0.72 = 4.4$. Теоретическая кривая для $\ell < 25$ отвечает так называемому плато Сакса-Вольфа и представляет собой участок, близкий к плоскому. Однако на рис. 3.11 (начальный участок спектра) отчетливо заметны несколько экспериментальные максимумов в районе $\ell \sim 3 \div 7$ (авторы [Dunkley et al., 2008] представляют несколько вариантов обработки данных).

Интересно сравнить предсказания с ТШРВ с тем, что говорит об этом стандартная Λ CDM-модель. Последняя предсказывает (см. [Палаш, 1999]), что зависимость между достигнутой степенью расширения вселенной $y=a/a_0$ и безразмерным временем $H_0 t$, прошедшим с момента Большого взрыва, дается соотношением

$$H_0 t = \int_0^{y(t)} \frac{dx}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{x} - 1\right)\Omega_m + (x^2 - 1)\Omega_\Lambda}}$$

Здесь $a(t)$ – размер Вселенной в момент времени t , индекс “0” обозначает современные значения размера a и постоянной Хаббла H , так что $y(t_0) = 1$. Параметры Ω_m и Ω_Λ обозначают относительные плотности материи и Λ -компоненты. Результаты численного интегрирования представлены выше на рис. 3.9. Как видим, для Λ CDM-модели при “оптимальных” значениях параметров ($\Omega_\Lambda=0.75$ и $\Omega_m=0.25$) безразмерный возраст Вселенной $H_0 t$ также практически равен единице.

С другой стороны, “полный угол облета Вселенной” для любой модели можно записать в виде

$$\Theta = \int_0^t c d\tau / a_0 y(\tau)$$

При численных расчетах этот интеграл можно заменить суммой

$$\Theta(H_0 t) = (c/a_0)/H_0 \sum_0^t [\Delta(H_0 \tau)/y(H_0 \tau)]$$

где суммирование должно вестись по последовательным (достаточно малым) интервалам времени. Эти интервалы не обязательно должны быть равными между собой, практически удобнее сделать шаги равномерными по $y(H_0\tau)$.

В безразмерном множителе перед знаком суммы фигурируют современные значения постоянной Хаббла H_0 (которое определяется по данным астрофизических измерений) и абсолютного размера Вселенной a_0 . Поскольку фактическая величина a_0 нам неизвестна, то этот множитель определяется моментом времени, когда отношение (a/a_0) достигает единицы в выбранной космологической модели (см. рис. 3.6 и таблицу ниже).

Модель	$H_0 t_0$	$(c/a_0)/H_0$	$\Theta(H_0 t_0)$, рад
ТШРВ	1	1	7.00
Λ CDM // $\Omega_\Lambda = 0, \quad \Omega_m = 1$	0.6672	1.4988	2.93
Λ CDM // $\Omega_\Lambda = 0.75, \quad \Omega_m = 0.25$	1.0143	0.9859	3.42

Результаты численных расчетов угла Θ (“углового” горизонта частиц) показаны на рис. 3.12. Как легко видеть, для обеих версий Λ CDM-модели угол Θ нарастает по одной и той же зависимости (хотя участки этой кривой ограничены различным возрастом Вселенной).

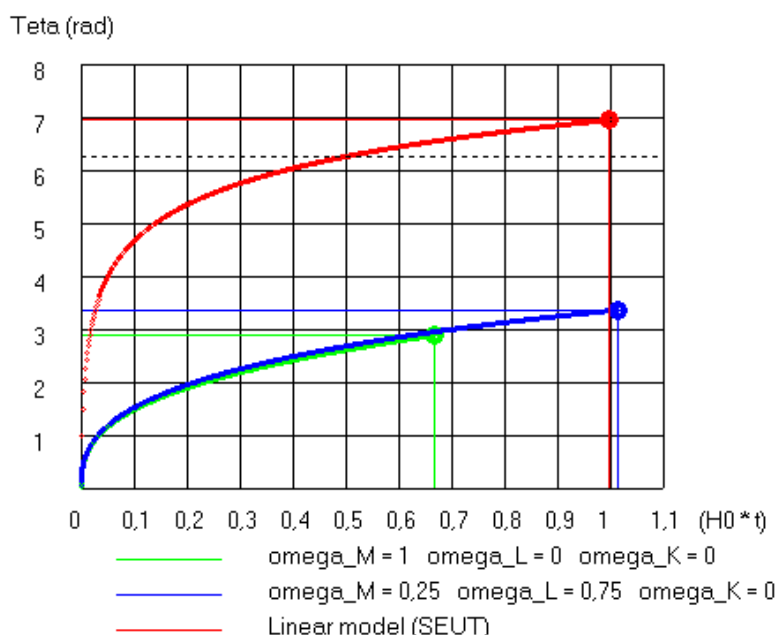


Рисунок 3.12. Зависимость “угла облета” фотонами Вселенной в разных космологических моделях

Найденные значения углов для Λ CDM-моделей практически исключают возможность проявления в их рамках эффекта старейших фотонов на спектре реликтового излучения. Только в ТШРВ конечный угол пересекает критическое значение 2π (на рис. 3.12 показано пунктирной линией), причем основное различие моделей проявляется в течение начального 10%-этапа времени расширения.

3.14. Проблема пониженной яркости вспышек Сверхновых

В последние годы сложилось мнение, что экспериментальные данные указывают на переход к стадии ускоренного расширения Вселенной. В первую очередь этот вывод основан на измерениях яркости сверхновых звезд: пониженная яркость предсказывается моделью Вселенной с определенным значением вышеуказанной космологической постоянной Λ (которое, собственно, и подбирается из условия наилучшего соответствия эксперименту).

Между тем в рамках предлагаемого подхода несложно получить не менее удовлетворительное количественное объяснение пониженной яркости сверхновых, основываясь на *линейном* во времени расширении Вселенной и не занимаясь какой-либо “подгонкой” модели. Тем самым, *вопреки широко распространенному представлению, ставится под большое сомнение якобы экспериментально установленный факт ускоренного расширения Вселенной в современную эпоху.*

В стандартной космологии связь между координатным $r(z)$ и фотометрическим $\ell(z)$ расстояниями до источника светового сигнала, испущенного при величине красного смещения z , дается (при $c = 1$) соотношением:

$$\ell(z) = H_0 a_0 r(z) (1 + z)$$

где H_0 и a_0 – соответственно постоянная Хаббла и масштабный фактор Вселенной в настоящее время. Множитель $(1 + z)$ в статической Вселенной отсутствует, а в расширяющейся Вселенной учитывает *изменение* пространственного масштаба за время распространения светового сигнала. С другой стороны, множитель $r(z)$ выражает через z *само безразмерное расстояние*, пройденное световым сигналом от источника до приемника без учета расширения Вселенной как такового (оно, очевидно, равно нулю при $z = 0$).

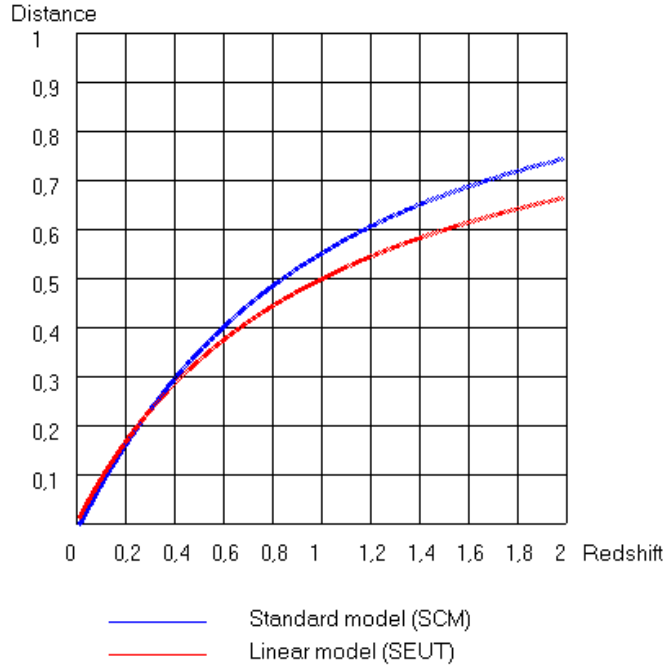


Рисунок 3.13.

Зависимость от красного смещения z величины $H_0 a_0 r(z)$ в СКМ (SCM) и ТШРВ (SEUT)

Произведение $H_0 a_0 r(z)$ в модели Эйнштейн-Фридмана (ЭФ) равно ([Палаш, 1999]):

$$H_0 a_0 r(z) = \frac{1}{\sqrt{|\Omega_k|}} \operatorname{sinn} \left[\sqrt{|\Omega_k|} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{(1+z')^2(1+\Omega_m z') - z'(2+z')\Omega_\Lambda}} \right],$$

где “sinn” означает гиперболический синус при $\Omega_k > 0$ и обычный синус при $\Omega_k < 0$. Здесь используются безразмерные параметры компонент плотности, обусловленные материей (Ω_m), кривизной (Ω_k) и космологической постоянной (Ω_Λ), причем $\Omega_m + \Omega_k + \Omega_\Lambda = 1$. Если $\Omega_k = 0$, то sinn и Ω_k исчезают из этого выражения, остается лишь сам интеграл.

На рис. 3.13 приведен полученный численным путем график $H_0 a_0 r(z)$ для так называемой стандартной космологической модели (СКМ, SCM) при $\Omega_m = 0,25$, $\Omega_\Lambda = 0,75$, $\Omega_k = 0$ (синяя

кривая). На том же рисунке красной линией показана зависимость $H_0 a_0 r(z)$ для упомянутой выше космологической модели ТШРВ (SEUT). В ней расстояние от наблюдателя до объекта с красным смещением z описывается простым соотношением $1 - 1/(1+z) = z/(z+1)$.

На рис. 3.14 показана (см. [Перлмутер, 1999]) разность зависимостей “магнитуда светимости – красное смещение” для космологических моделей Фридмана с различными значениями Ω_m и Ω_Λ (при $\Omega_k = 0$). Разность магнитуды Δm при данном z для различных моделей А и В может быть найдена из простого соотношения

$$\Delta m = 5 \cdot \lg [r_A(z) / r_B(z)]$$

(где 5 – исторически возникший коэффициент, см., например, [Клапдор-Клайнгротхаус, Цюбер, 2000]).

Из рис. 3.17 следует, что кривые для СКМ и ТШРВ отличаются (при $z < 2$) не более, чем на 10%. Соответственно, магнитуды их светимости отличаются не более чем на 0,2 (это практически отвечает погрешности при измерениях), так что обе модели дают совпадающие предсказания. Таким образом, проблема пониженной светимости сверхновых звезд для больших значений красного смещения в общепринятой модели Эйнштейна – Фридмана возникает как следствие *нелинейной* зависимости размера Вселенной от ее возраста. Одним из традиционных способов преодоления этой трудности является введение космологического члена и “подгонка” численного соотношения между безразмерными компонентами плотности ($\Omega_m = 0,25$, $\Omega_\Lambda = 0,75$, $\Omega_k = 0$). В ТШРВ же не требуется ни введения космологического члена, ни численной “подгонки”, а необходимый эффект достигается вследствие базовой гипотезы о *линейном* расширении Вселенной. Тем самым, вопреки широко распространенному представлению, *ставится под большое сомнение якобы экспериментально установленный факт ускоренного расширения Вселенной в современную эпоху.*

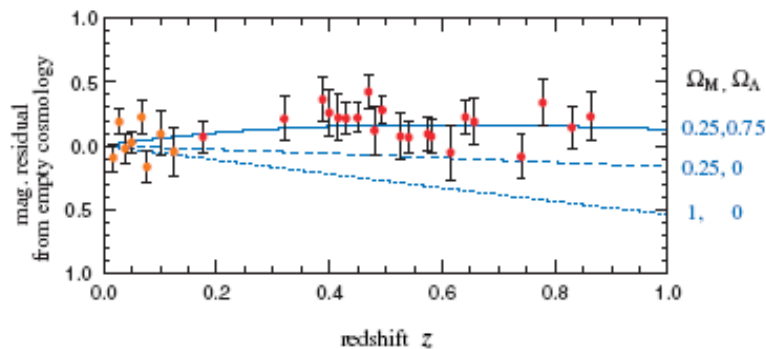


Рисунок 3.14. Разность зависимостей “светимость – красное смещение” для космологических моделей Фридмана с различными значениями Ω_m и Ω_Λ (при $\Omega_k = 0$)

3.15. Зависимость углового размера галактик от красного смещения

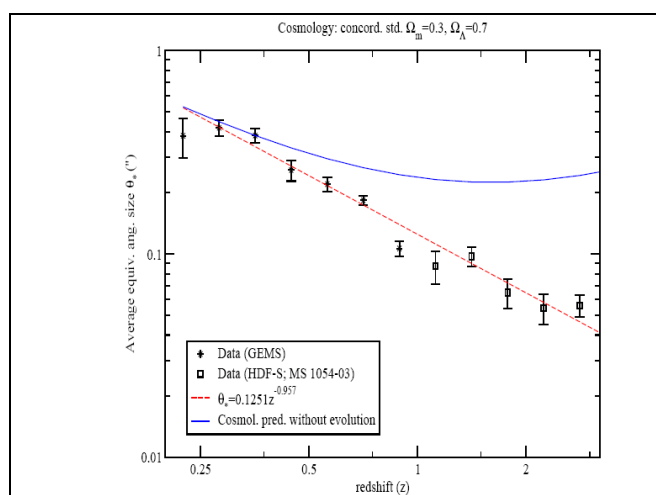


Рисунок 3.15 [Lopez-Corredoira, 2010]

Расчетные и экспериментальная зависимости усредненного углового размера галактик от красного смещения из работы.

Как известно, зависимость углового размера галактик от величины их красного смещения рассматривается как важный тест для космологических теорий. В недавно появившейся публикации [Lopez-Corredoira, 2010] ее автор исследует эту зависимость на большом статистическом материале (при расчетах светимость галактик приводится к унифицированным условиям). Полученные при обработке данные сравниваются с предсказаниями пяти различных космологических моделей. По оценке автора, наблюдаемый в действительности угловой размер галактик примерно *обратно пропорционален* величине красного смещения (рис. 3.15), тогда как стандартная космологическая модель – СКМ (синяя кривая) плохо соответствует полученным результатам.

Ниже предпринимается попытка показать соответствие экспериментальных результатов нашей космологической модели – ТШРВ.

Для расширяющейся со временем Вселенной понятие расстояния можно ввести, как известно, различными способами. Уподобим двумерный аналог Вселенной раздувающейся оболочке воздушного шара, на которую нанесена сеть координат, например – в виде параллелей и меридианов. Расстояния между координатными линиями растут, однако сама сетка отвечает некоторой безразмерной системе координат. Например, если мы нанесли на поверхности нашего шара-глобуса 10 меридианов, то они при любом текущем радиусе шара делят экватор (и любую параллель) на 10 одинаковых отрезков. Длина, измеряемая в этих отрезках, называется *сопутствующим координатным расстоянием* (comoving distance coordinate) L_{comov} . С другой стороны, физически эта длина, разумеется, изменяется с ростом радиуса шара, и определяет метрическое (физическое) расстояние L_{metr} . Понятно, что переход от одного вида расстояния к другому осуществляется с помощью масштабного фактора $a(t)$ – текущего радиуса шара:

$$L_{\text{metr}} = a(t) L_{\text{comov}}$$

В современную эпоху $a(t_0)=1$, в более ранние моменты эволюции Вселенной $0 < a(t) < 1$.

Измерение угловых размеров объектов во Вселенной требует учета как минимум двух обстоятельств. Во-первых, мы видим удаленные объекты не такими, которыми они являются сейчас, а такими, какими они были в момент испускания регистрируемых нами (сейчас) фотонов. Во-вторых, ход световых лучей зависит от типа пространственной геометрии Вселенной.

Обратимся сначала ко второму обстоятельству. Отличием ТШРВ от СКМ является тот факт, что в ней Вселенной приписывается сферический тип метрики (закрытая модель геометрии). Рассмотрим рис. 3.16. Окружность с радиусом R и центром в точке O воспроизводит упрощенное представление сферической Вселенной. Наблюдатель расположен в точке A , галактика – в точке D , где $BD=r$ – радиус малой окружности. Угол Ω соответствует (поперечному) размеру галактики $d=CE \approx \Omega * BD = \Omega * r$, где отрезок CE перпендикулярен плоскости чертежа и радиальному сопутствующему расстоянию AD .

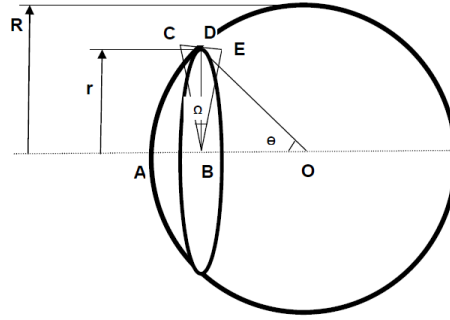


Рисунок 3.16. Связь между углом и расстоянием на сферической поверхности

Итак, для области, обладающей сферической геометрией, соотношение между поперечным размером галактики d и ее угловым размером для наблюдателя в точке A записывается в виде

$$d \approx a R \sin(r/R) \Omega = R \sin(r/R) \Omega / (1+z)$$

На рис. 3.18 радиальному сопутствующему расстоянию от наблюдателя до галактики соответствует угол Θ , для которого $\sin \Theta = r/R$. Важно заметить, что *этот угол также является функцией величины красного смещения z* .

Теперь следует в *полной* мере учесть первое обстоятельство – эволюцию размеров Вселенной от момента излучения галактикой фотонов до момента их регистрации современным наблюдателем на Земле. Фактически мы уже учли эволюцию *радиального* метрического расстояния между галактикой и наблюдателем, введя сомножитель $a(z)$ в *правую* часть вышеприведенного соотношения. Остается учесть зависимость $\Theta(z)$, а также однозначным образом уточнить, что происходит с *поперечным* размером d галактики в левой части. Целесообразно рассмотреть два варианта:

- Поперечный размер галактики остается неизменным, увеличивается только радиальное расстояние между галактиками (т.е. процесс расширения Вселенной проявляется только в крупном масштабе, не затрагивая эволюцию размера галактик).
- Поперечный размер галактики увеличивается так же, как и радиальное расстояние между галактиками (процесс расширения Вселенной проявляется одинаковым образом на любых масштабах).

Прежде всего, укажем, что в ТШРВ имеется простая аналитическая связь между углом Θ , отвечающим радиальному сопутствующему расстоянию от наблюдателя до галактики, и величиной красного смещения z (см. раздел 3.14 и [Шульман и Рэффел, 2008]):

$$\Theta(z) = \ln(1+z)$$

Поэтому для модели с *неизменным* поперечным размером галактики находим:

$$\Omega_{\text{const}}(z) \approx d/[a(z) R \sin \Theta(z)] = (1+z) d / R \sin[\ln(1+z)]$$

При малых z имеем

$$\Omega_{\text{const}}(z) \approx (1+z) \cdot d / [R \sin(z)] \approx (1+z) d / (Rz) = \text{const} \cdot (1+z) / z.$$

С другой стороны, для модели с поперечным размером, *эволюционирующим точно так же*, как и радиальное расстояние, множитель $a = 1/(z+1)$ появляется перед *обеими* этими величинами и поэтому в конечном счете сокращается, так что в этом случае имеем:

$$\Omega_{\text{var}}(z) \approx a(z) d / [a(z) R \sin \Theta(z)] = d / R \sin[\ln(1+z)]$$

При малых z имеем

$$\Omega_{\text{var}}(z) \approx d / [R \sin(z)] \approx d / (Rz) = \text{const} / z.$$

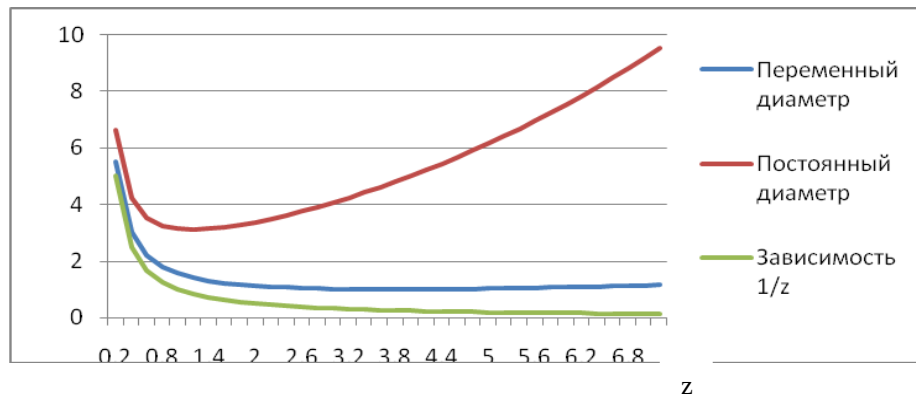


Рисунок 3.17

Расчетные и аппроксимирующая эксперимент (зеленая линия) зависимости углового размера галактик от красного смещения z для моделей ТШРВ с постоянным (красная линия) и эволюционирующим (синяя линия) поперечным размером галактики.

Как легко видеть, во втором случае при малых z мы приходим к качественному совпадению с данными экспериментов, полученными в работе **[Lopez-Corredoira, 2010]**.

На рис. 3.17 приведены данные точных расчетов в сравнении с аппроксимирующей зависимостью $\Omega(z) \sim 1/z$ (зеленая кривая). Красная кривая (для модели с неизменным поперечным метрическим размером галактики) явно расходится с зеленой кривой уже при z , близких к 1. С другой стороны, синяя кривая и качественно, и количественно гораздо ближе к зеленой, и лишь при $z > 4$ начинает очень медленно расти.

Таким образом, ТШРВ позволяет получить достаточно сходное с данными эксперимента описание зависимости углового размера галактик от величины красного смещения. Этот вывод, однако, жестко связан с предположением, что поперечный размер галактик эволюционирует при расширении Вселенной точно так же, как и радиальное расстояние до них.

В литературе можно встретить различные суждения относительно эволюции поперечных размеров астрофизических объектов (см., например, **[Lee, 2009]**), иногда даже в пределах одной и той же монографии. Так, автор **[Longair, 2008]** в параграфе 5.4 пишет (перевод мой - М.Х.Ш.):

Собственные расстояния, перпендикулярные линии взгляда, также должны изменяться в соответствии с масштабным множителем a между моментами времени t и t_0 в силу изотропии и однородности модели мира...

Однако в параграфе 7.4.4 он уподобляет галактики линейкам с фиксированным размером ("rigid rods") и приводит формулы для определения углового размера, основанные именно на этом предположении.

Авторы научно-популярной статьи [Линевивер и Дэвис, 2005] специально останавливаются на этом вопросе и аргументируют неизменность размера галактик тем, что при изменении расстояний внутри них (и других локальных систем) нарушается баланс сил тяготения, поэтому возникает тенденция к восстановлению первоначальных расстояний. Для СКМ этот довод кажется оправданным: сила тяготения между любыми двумя массами m_1 и m_2 действительно пропорциональна R^{-2} , где R – расстояние между ними. Однако в ТШРВ данное утверждение *неверно*, поскольку в ней одновременно с этим пропорционально R растет также и каждая масса, так что в конечном счете сила притяжения $F = Gm_1m_2/R^2$ остается неизменной, т.е. баланс сил при расширении Вселенной не нарушается.

Необходимо также отметить следующее. В §2 главы 15 известной монографии [Weinberg, 1972] ее автор пишет, что если верить полученным из наблюдений значениям “параметра замедления” и постоянной Хаббла, то с необходимостью получается, что плотность Вселенной около $2\rho_{кр}$. Но в ТШРВ выводится именно такое ($\rho = 2\rho_{кр}$) соотношение между фактической и критической плотностями!

3.16. Зависимость численности галактик от красного смещения

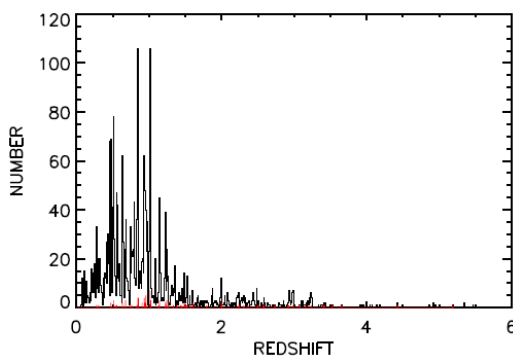


Рисунок 3.18.

Наблюдаемая функция распределения галактик по величине красного смещения ([Barger et al., 2008]).

В работе [Barger et al., 2008] приведена реально наблюдаемая функция распределения для нескольких тысяч галактик по величине красного смещения (рис. 3.18).

Сопоставление эмпирически полученных данных с прогнозами, которые дают различные теоретические модели, представляет интерес с точки зрения выбора в пользу одной из них. Сразу укажем, что поскольку красное смещение обычно связывают со скоростью расширения Вселенной, то вряд ли имеет смысл рассматривать *статичные* модели¹⁸.

В каждой *расширяющейся* модели данному значению красного смещения z соответствует число галактик $N(z)$, удаленных от наблюдателя на одно и то же расстояние; иначе говоря, все эти галактики локализованы на одной и той же сферической (не обязательно евклидовой) поверхности. Очевидно, что указанное число галактик равно произведению *поверхностной* концентрации $n(z)$ галактик на такой сфере на площадь поверхности сферы:

$$N(z) = n(z) \cdot S(z)$$

Что касается площади S сферической поверхности, то здесь необходимо учитывать два фактора – эффект эволюции масштабного фактора Вселенной со временем и характер

¹⁸ Иногда формальная связь между расстоянием до наблюдателя и красным смещением электромагнитного сигнала от объекта в статичной Вселенной все же допускается в качестве своего рода эвристического принципа (см. [Lopez-Corredoira, 2010]).

пространственной геометрии Вселенной. Удобно использовать безразмерную меру θ удаленности наблюдаемого объекта от современного наблюдателя:

$$\theta(t) = \int_t^{t_0} d(c\tau)/a(\tau)$$

где t_0 – современный возраст Вселенной, t – ее текущий возраст (соответствующий некоторой величине z красного смещения), $a(t)$ – в данной формуле: текущий радиус Вселенной, численно равный ее масштабному фактору (поскольку $a(t_0) = 1$). Нетрудно заметить, что выражение под интегралом в закрытой модели представляет собой тангенс центрального угла расширяющейся сферы, т.е. (в пределе) малое приращение самого этого угла при малом же приращении радиуса. Поэтому интеграл можно считать полной величиной соответствующего угла, выраженного в радианах.

На самом деле нас интересует не параметр $\theta(t)$, а другой параметр – $\theta(z)$. Очевидно, что он *зависит* от того, *как именно* меняется параметр z с течением времени. Зная его, можно выразить площадь интересующей нас поверхности $S(z)$. Это сделано в приведенной ниже таблице.

Определение площади ограничивающей поверхности
для различных геометрических моделей Вселенной

Сферическая (замкнутая) модель	Плоская модель	Гиперболическая (открытая) модель
$S \sim [a(z) \cdot \sin \theta(z)]^2$	$S \sim [a(z) \cdot \theta(z)]^2$	$S \sim [a(z) \cdot \text{sh } \theta(z)]^2$

Дальнейшие модельные рассуждения зависят от выбора закона, по которому *поверхностная концентрация галактик на такой поверхности* изменяется по мере эволюции Вселенной. Ниже мы ограничимся двумя простейшими гипотезами.

Первая гипотеза исходит из того, что *полное* число галактик во Вселенной не изменяется в ходе ее эволюции, т.е. не зависит от величины красного смещения. В этом случае при увеличении масштабного фактора $a(z)$ галактики “разбегаются”, объемная плотность галактик обратно пропорциональна кубу масштабного фактора (поверхностная плотность – обратно пропорциональна квадрату этого фактора), а новых галактик практически не возникает, или их появление компенсируется исчезновением прежних. В этом случае поверхностная плотность галактик будет равна

$$n(z) = n_0/[a(z)]^2$$

где n_0 – поверхностная плотность галактик в современную эпоху, $a(z)$ – масштабный фактор.

Согласно второй гипотезе, *неизменной* предполагается *плотность* галактик¹⁹ в единице объема (и на единице поверхности), т.е. $n(z) = \text{const}$. Это означает, что, наряду с разбеганием уже существующих галактик (о чем говорит закон Хаббла), все время *возникают новые галактики*, которые заполняют свободные области Вселенной.

Скорее всего, оба предположения являются неточными, и окончательный ответ дадут только результаты наблюдений.

Рассмотрим теперь стандартную космологическую модель (СКМ), которая предполагает, что Вселенная пространственно *бесконечна* и обладает *плоской* геометрией (этот вывод делается на основании оптимальной аппроксимации значений предполагаемых

¹⁹ Отметим, что гипотеза о постоянстве плотности галактик в единице объема используется, например, в книге [Клапдор-Клейнгротхаус, Цюбер, 2000].

космологических параметров по данным наблюдений). Вот типичное описание этой модели, взятое из известной книги [Greene, 2004]:

... если вселенная пространственно бесконечна, уже имеется бесконечная пространственная протяженность в момент Большого взрыва... В такой обстановке Большой взрыв не имел места в одной точке; напротив, Большой взрыв имел место везде на бесконечной протяженности. По сравнению с обычным точечным началом, это похоже на много Больших взрывов в каждой точке бесконечной пространственной протяженности. После Взрыва пространство раздувалось, но его общий размер не возрастал, поскольку нечто, уже бесконечное, не может стать еще больше. Что возрастало, так это расстояния между объектами вроде галактик (как только они сформировались).

Правда, в этой связи хочется задать вопрос, ответ на который вряд ли удастся получить: если в *начальный* момент все расстояния равны *нулю*, то как можно отрицать, что все взрывы все же имели место в одной *единственной* точке, а не во множестве удаленных одна от другой на *ненулевое* расстояние точек?

В такой модели, очевидно, $N(z)$ пропорционально квадрату введенной нами величины θ , характеризующей удаленность наблюдаемого объекта от современного наблюдателя. Эта величина определяется в СКМ с помощью численного интегрирования (см., например, [Палаш, 1999]). Для ее определения через время пролета фотонов могут быть использованы также готовые “космологические калькуляторы” (<http://www.astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html>).

С другой стороны, $N(z)$ зависит и от выбора между упомянутыми выше гипотезами относительно эволюции или постоянства пространственной плотности галактик. Если принять первую гипотезу (полное число галактик во Вселенной постоянно), то на искомое распределение эволюция масштабного фактора вообще не влияет, т.к. множитель $[a(z)]^2$ входит и в знаменатель $n(z)$, и в числитель $S(z)$, т.е.

$$N_1(z) \sim [\theta(z)]^2$$

Если же мы исходим из второй гипотезы (объемная плотность галактик постоянна), то необходимо учесть также и эволюцию поверхностной плотности галактик (она пропорциональна $[a(z)]^2$, так что распределение имеет вид:

$$N_2(z) \sim [a(z)]^2 [\theta(z)]^2$$

Результаты расчетов представлены на рис. 3.19 (первой гипотезе соответствует *синяя* кривая, второй гипотезе – *красная* кривая (кривые представлены в различном масштабе по оси ординат). Синяя кривая монотонно возрастает совсем не похожа на реально наблюдаемое распределение. Красная же кривая имеет максимум примерно при $z=1.5$ и качественно соответствует наблюдаемой форме распределения.

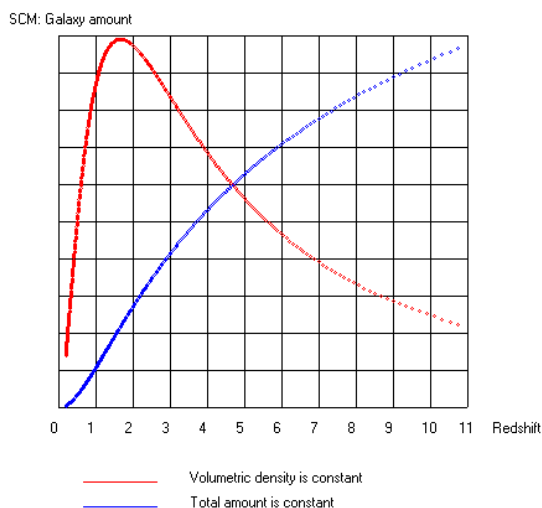


Рисунок 3.19.

Теоретическое распределение числа галактик (Galaxy amount) в зависимости от величины красного смещения (Redshift) в моделях СКМ (SCM):
синяя кривая, если постоянно полное число галактик во Вселенной,
красная кривая, если постоянна плотность галактик в единице объема
 (кривые представлены в различном масштабе по оси ординат)

В ТШРВ эволюция Вселенной описывается 4-мерным конусом с прямолинейной образующей (т.е. с линейной зависимостью радиуса Вселенной от ее возраста). Пространственное сечение этого конуса в каждый момент времени представляет собой 3-мерную неевклидову гиперповерхность 4-мерного шара (рис. 3.20). Замкнутая геометрия пространственного сечения конуса обусловлена тем, что в ТШРВ средняя плотность материи во Вселенной заведомо больше критической.

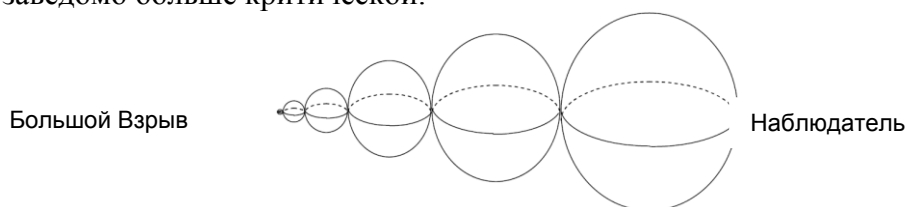


Рисунок 3.20.

Модель расширяющейся замкнутой Вселенной в ТШРВ

В этой модели распределение $N(z)$ заведомо оказывается немонотонным, т.е. обязательно имеет максимум при некотором значении величины красного смещения. Чтобы увидеть это, используем сначала первую из упомянутых выше гипотез, согласно которой полное число галактик остается неизменным, и эволюция размера Вселенной в конечном счете не влияет на распределение $N(z)$. Рассмотрим прежде аналогичную, но значительно более наглядную задачу – закон изменения *длины окружности*, ограничивающей часть неевклидовой поверхности сферы *постоянного* радиуса R (рис. 3.21).

Легко видеть, что при движении (от наблюдателя) слева направо длина $2\pi r$ “малой” окружности сначала возрастает от 0 до максимального значения $2\pi R$, а затем снова убывает до нуля (напомним, что длина окружности на *евклидовой* плоскости возрастает с радиусом *монотонно* и *неограниченно*). Величину радиуса r “малой” окружности можно считать функцией линейного центрального угла θ большого сечения сферы (рис.3.21), где θ изменяется от 0 до π .

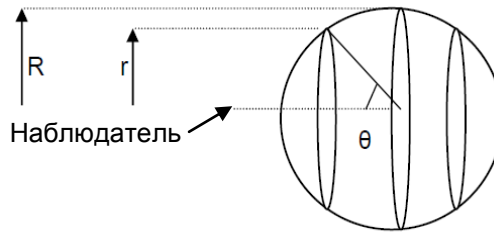


Рисунок 3.21.

Эволюция длины окружности при движении слева направо

В этой 2-мерной аналогии мы мысленно поместили наблюдателя в самой левой точке сферы, а на малой *окружности* радиуса $r = R \sin \theta$ находится наблюдаемый объект, испускающий электромагнитный сигнал. В реальной 3-мерной ситуации, вместо равноудаленных от наблюдателя точек *малой окружности*, мы должны говорить о точках *малой сферы*. Если *длина* малой окружности в 2-мерной аналогии равнялась $[2\pi R \sin \theta]$, то в 3-мерном случае *площадь* такой неевклидовой *малой поверхности* равняется $[4\pi R^2 \sin^2 \theta]$, при $\theta = \pi/2$ эта площадь максимальна и равна площади поверхности обычной 3-мерной сферы радиуса R . Именно величина этой площади и определяет в данном случае число галактик, расположенных от наблюдателя на расстоянии, соответствующем данному z :

$$N_3(z) \sim \sin^2 \theta$$

Как показано выше и в работе [Шульман и Рэффел, 2008], угол θ (в радианах) в ТШРВ равен

$$\theta(z) = \ln [a(0)/a(z)],$$

где $a(z)$ – масштабный фактор²⁰ Вселенной для текущей величины красного смещения z .

Если же мы будем исходить из второй гипотезы, в которой неизменными полагаются объемная и поверхностная *плотность* галактик, то мы должны учитывать и размер Вселенной для каждого данного значения z . Этот учет осуществляется простым умножением найденного выше значения площади малой поверхности на квадрат текущего значения масштабного фактора Вселенной, т.е.:

$$N_4(z) \sim a^2 \sin^2 \theta$$

Распределения, отвечающие модели ТШРВ и двум упомянутым гипотезам, представлены на рис. 3.22. Как и должно быть, максимум для красной кривой (для которой дополнительно учитывается уменьшение масштабного фактора Вселенной с ростом величины z) расположен левее ($z=1.2$), чем для синей ($z \approx 4$). И в этом случае красная кривая достаточно хорошо аппроксимирует реально наблюдаемую зависимость.

Полученные нами результаты показывают, что решающую роль играет не геометрия модели (СКМ с плоской метрикой или ТШРВ со сферической метрикой), а гипотеза о законе эволюции числа галактик во Вселенной.

Так, гипотеза о *постоянстве полного числа галактик* во Вселенной на протяжении ее эволюции не позволяет получить качественного совпадения с реально наблюдаемым распределением ни в СКМ, ни в ТШРВ, при этом соответствующие предсказания существенно различаются и между собой.

В то же время использование альтернативной гипотезы, согласно которой на протяжении эволюции Вселенной поддерживается *неизменной пространственная плотность галактик*,

²⁰ В ТШРВ масштабный фактор $a(z)$ пропорционален текущему возрасту Вселенной.

позволяет получить в рамках обеих моделей практически одинаковое распределение, которое достаточно близко к реально наблюдаемому.

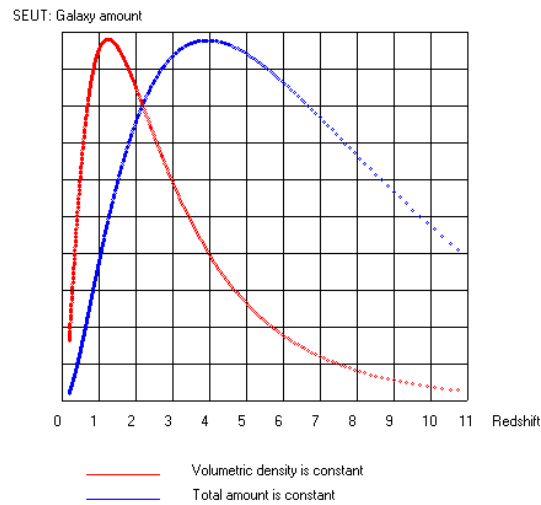


Рисунок 3.22.

Теоретическое распределение числа галактик (Galaxy amount) в зависимости от величины красного смещения (Redshift) в моделях ТШРВ (SEUT):
синяя кривая, если постоянно полное число галактик во Вселенной
красная кривая, если постоянна плотность галактик в единице объема
 (кривые представлены в различном масштабе по оси ординат)

4. МОДЕЛЬ ШАРОВОЙ РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ВСЕЛЕННОЙ

4.1. Исходные представления о пространстве-времени в модели шаровой расширяющейся Вселенной

В космологической модели Эйнштейна-Фридмана представление о времени вводилось априори, а полученное решение в общем случае не было линейным во времени. Линейный рост во времени радиуса кривизны Вселенной в предложенной модели приводит нас к догадке, что, собственно говоря, *течение физического времени и проявляется в каждой ее точке именно как изменение величины этого радиуса*, что именно поэтому измерение времени разными средствами и способами должно давать принципиально согласованные результаты, и что, наконец, никакого иного времени как универсального физического феномена (относительно которого было бы возможно неравномерное изменение радиуса кривизны) просто не существует. Если эта догадка верна, то ход времени - это *не фон*, на котором тем или иным образом происходит расширение Вселенной, *а само содержание* этого процесса.

Развивая эту основополагающую для данной работы идею, будем исходить теперь из того, что положенный в основу математических построений космологических теорий 4-мерный шар следует рассматривать как объективно существующий; наша Вселенная расширяется в 4-мерном *евклидовом*²¹ пространстве и представляет собой 3-мерную гиперповерхность этого шара (подчеркнем, что мы полагаем это 4-мерное пространство совершенно одинаковым по всем четырем измерениям, которые ничем не отличаются между собой).

Живущие в 3-мерном мире существа и не подозревали бы о наличии 4-мерного суперпространства, если бы не процесс расширения шара. Этот процесс объективно выделяет в каждой точке гиперповерхности шара направление, нормальное к ней и не принадлежащее ей самой. Вот это направление (4-е измерение) в каждой точке 3-мерной Вселенной и представляет собой *истинное время*.

В силу расширения шара последовательная совокупность экземпляров его внешней гиперсферы, подобно годичным кольцам на срезе ствола дерева, отмечает последовательность моментов времени существования Вселенной. Иными словами, “вектор” времени направлен от центра шара вдоль его радиуса и не принадлежит самой гиперповерхности шара. Напротив, оставшиеся три пространственных вектора 4-мерного ортогонального базиса всегда принадлежат самой текущей гиперсфере, характеризующейся внутренней неевклидовой (сферической) геометрией. Таким образом, в каждый отдельный момент времени наша Вселенная трехмерна и отличается конкретным значением радиуса кривизны (радиуса 4-сферы). Течению времени отвечает возрастание этого радиуса. Заметить течение времени мы можем, выявляя косвенные признаки непостоянства радиуса кривизны.

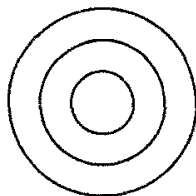


Рис. 4.1. Изохроны, соответствующие увеличивающемуся возрасту Вселенной

Исходная идея теории шаровой расширяющейся Вселенной (ТШРВ) состоит в обусловленности течения времени феноменом расширения Вселенной. Поэтому *одновременными* должны считаться 4-мерные события, чьи образы-точки являются точками пересечения множества мировых линий *с одной и той же текущей гиперсферой*. Собственно, каждая такая гиперсфера, будучи внешней оболочкой 4-шара в текущий момент времени,

²¹ Псевдоевклидоость возникает в дальнейшем как артефакт.

представляет собой как бы мгновенную фотографию Вселенной, поэтому мы будем называть ее *изохроной*.

Изменение возраста Вселенной однозначно ассоциируется с 4-мерным расстоянием между изохронами. Поэтому естественно ввести понятие *абсолютного* времени²², отождествив его с этим расстоянием (деленным на скорость света c), которое должно отсчитываться вдоль 4-мерного радиуса. С другой стороны, если разным моментам возраста Вселенной отвечают различные изохроны, то говорить о (3-мерных) пространственных промежутках в ТШРВ можно лишь применительно к различным точкам одной и той же изохроны.

Такое определение времени, вообще говоря, интуитивно прозрачно и, как оказывается, исключительно плодотворно. Оно позволяет объяснить само понятие движения, а также постигнуть истинный смысл мира Эйнштейна - Минковского и преобразований Лоренца. Однако для этого придется пересмотреть некоторые привычные представления. Так, мы откажемся оперировать с 3-мерными образами “частиц” и иных объектов, с которыми имеет дело современная физика. Для нее понятие “мировой линии” частицы является скорее метафорой, и характерно “наблюдение” за частицами в пределах ограниченных отрезков времени. В противоположность этому следует принять, что исходными и объективно существующими объектами изучения являются как раз мировые линии, которые наше “3-мерное” сознание воспринимает как фрагменты в малой области пространства-времени. Именно мировые линии, с моей точки зрения, обладают теми объективными свойствами, которые должны быть положены в основу нового научного подхода, и эти свойства носят фундаментально глобальный (по отношению к размерам 4-мерного шара) характер.

С этой новой точки зрения *не существует бесконечного множества независимых механических движений*. Существуют мировые линии “движущихся” тел, направленные под тем или иным углом к линии времени – нормали к гиперповерхности 4-шара. *Угол наклона и определяет скорость пространственного движения*. При увеличении радиуса шара точка пересечения мировой линии с текущей гиперповерхностью “перемещается” в точности так, как это предсказывается для движущейся материальной частицы современной физикой.

В частности, покоящиеся *в пространстве* объекты (например, галактики), у которых угол отклонения от нормали равен (точнее, близок к) нулю, т.е. мировые линии совпадают с нормалью к гиперсфере, “удаляются” друг от друга, как мы увидим в следующем подразделе, по закону Хаббла. Скорость их взаимного удаления пропорциональна расстоянию между ними. Для объектов, у которых угол отклонения мировой линии от нормали отличен от нуля, он не может превысить 90 градусов, поэтому естественным образом возникает *предельная скорость механического движения* (скорость света).

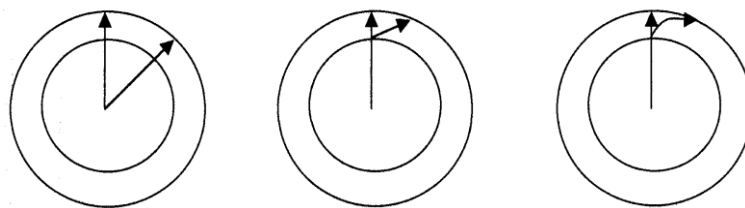


Рис. 4.2. Эффект “перемещения” точек на поверхности гиперсферы для неподвижных в пространстве объектов (слева), движущихся по инерции (в центре) и ускоренно (справа)

Три варианта движения показаны на рис. 4.2. Левая фигура иллюстрирует эффект Хаббла (увеличение расстояний между *покоящимися* объектами). Центральная фигура отвечает инерциальному движению, т.е. *прямолинейной* мировой линии (т.е. с постоянной скоростью). При таком характере мировой линии по мере возрастания радиуса Вселенной пропорционально изменяется и величина пути движущейся частицы. Таким образом, *инерциальное движение не*

²² В космологии его называют сопутствующим (космологическим) временем.

постулируется, а также возникает в качестве естественного следствия модели. На правой фигуре показана мировая линия при неинерциальном движении.

4.2. Закон Хаббла

Итак, согласно нашему подходу, именно само увеличение радиуса кривизны Мира (реальный физический феномен) воспринимается нами как течение времени.

Начнем с относительно неподвижных объектов - галактик. Несложно показать, что если именно возрастающую величину радиуса принять в качестве меры времени, то из простейших геометрических рассуждений сразу выводится закон Хаббла.

Действительно, проведем две прямолинейные мировые линии из центра (4-мерного) шара, “пронзающие” его поверхность. По мере его расширения пара лучей - мировых линий - как бы пересекает последовательность концентрических сфер, что и порождает эффект “разбегания” образов точек пересечения.

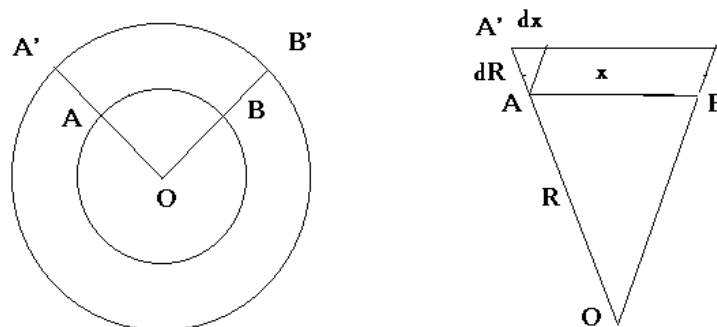


Рис. 4.3. Модель эффекта Хаббла

Рассматривая значение радиуса R “текущей” сферы как параметр, вычислим производную по этому параметру расстояния x между образами двух точек A и B (рис. 4.3), т.е. формальную “скорость” их разбегания в функции изменения R .

Для достаточно близких точек на сфере из подобия треугольников вытекает (рис.3.2), что

$$dx/dR = x/R$$

Заметим, что этим соотношением определена постоянная величина - угол с вершиной в центре расширения. Ничто не мешает нам выразить формальный параметр - радиус R - через любой другой, пропорциональный ему. Обозначим новый параметр через t , а в качестве коэффициента пропорциональности выберем любую константу V_0 с размерностью скорости. Тогда вместо приведенного соотношения получим:

$$dx/(V_0 \cdot dt) = x/(V_0 \cdot t)$$

или, после сокращения на V_0 в знаменателе:

$$dx/dt = x/t$$

Назовем теперь параметр t “временем”, а производную $v = dx/dt$ – “скоростью разбегания”. Чтобы получить закон Хаббла, остается лишь ввести постоянную его имени $H = 1/t$:

$$v = H \cdot x,$$

причем значение параметра t однозначно связано с экспериментально определяемой величиной H . Если мы хотим отождествить параметр t с “настоящим” временем, то в качестве константы V_0 следует принять скорость света c - экспериментально определенную константу пропорциональности между временным и пространственным эталонами расстояния. Теперь можно найти выражение и для радиуса кривизны “текущей” сферы:

$$R = c / H$$

4.3. Диаграммы причинности

Интересно сравнить представления о физической причинности в теории относительности и развиваемой здесь модели. В СТО эти представления наглядно изображаются общеизвестной диаграммой на рис. 4.4. На этой диаграмме некоторое интересующее нас (4-мерное) событие помещено в начало координат (точку пересечения осей t и x).

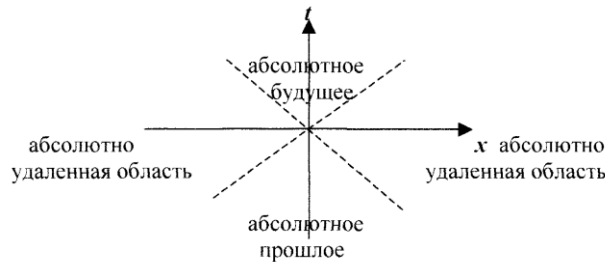


Рис. 4.4. Диаграмма “прошлое - будущее” в СТО

Пунктиры начального “светового конуса” разграничивают три области прилегающего континуума. Если другое событие расположено в области абсолютного прошлого по отношению к первому событию, то в любой системе отсчета оно предшествует первому, 4-мерный интервал между двумя событиями является времениподобным, а наименьшим временным промежутком они разделены в той системе отсчета, где их пространственные компоненты совпадают (т.е. в системе отсчета, “движущейся” от первого события ко второму). Симметричным образом обстоит дело в области абсолютного будущего, только здесь в любой системе отсчета первое событие предшествует второму. Если же второе событие лежит вне “светового конуса”, то в любой системе отсчета эти события происходят в разных местах пространства, причем наименьшим расстояние между ними является в той системе отсчета, где они происходят одновременно; это — “область абсолютного удаления” событий.

В развиваемой здесь теории ситуация трансформируется следующим образом: поскольку области пространства-времени в СТО, разделяемые изохронными поверхностями, лежат целиком *внутри* начального светового конуса, т.е. отвечают только причинно-связанным событиям, постольку на диаграммах ТШРВ *вообще нет места т.н. абсолютно-удаленным* точкам, лежащим *вне* начального светового конуса!

В рамках локального подхода, когда изохрона (сечение Вселенной данного радиуса, отвечающего возрасту T) изображается просто горизонтальной линией (см. рис. 4.5), область абсолютного будущего располагается над этой линией, область абсолютного прошлого — под линией, а абсолютно удаленная область совпадает с 3-мерным сечением Вселенной. В отличие от СТО, область вне начального “светового конуса” вырождается в 3-мерную гиперповерхность, т.е. совпадает с этим “световым конусом”.

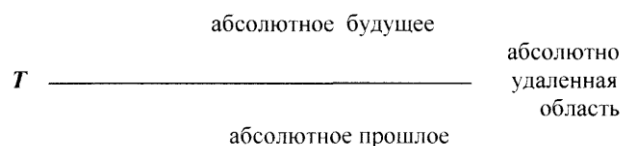


Рис. 4.5. Диаграмма “прошлое - будущее” в ТШРВ (локальное представление)

При глобальном рассмотрении пространственное сечение Вселенной изображается (на рис. 4.6) окружностью, совпадающей с абсолютно удаленной областью. Область абсолютного прошлого лежит внутри, а область абсолютного будущего – вне окружности.



Рис. 4.6. Диаграмма “прошлое - будущее” в ТШРВ (глобальное представление)

5. ИНЕРЦИАЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

5.1. Локальное приближение модели шаровой расширяющейся Вселенной

При огромном значении *текущего* (современного нам) радиуса 4-шара сама кривизна 3-мерной Вселенной становится крайне малой. Вместо ряда концентрических сфер-изохрон для *локального* анализа становится достаточным и удобным рассматривать параллельные слои изохрон, отвечающие Вселенной в различные моменты времени. Мировые линии, направленные *по радиусу* 4-шара, т.е. вдоль вектора времени, являются ортогональными к параллельным изохронам и физически отвечают “дрейфу во времени” *неподвижных* частиц. Напротив, мировые линии, *пересекающие изохроны под непрямым углом*, отвечают равномерно движущимся частицам.

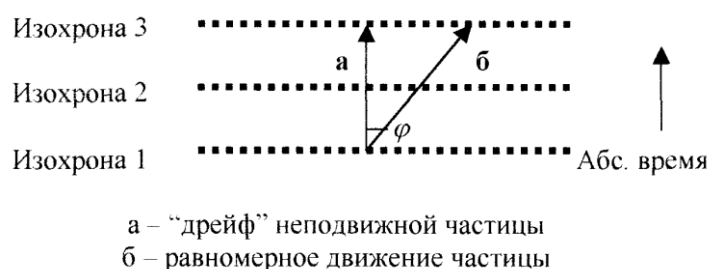


Рис. 5.1. Локальное представление расширения Вселенной

По мере расширения Вселенной (и исключительно за счет этого обстоятельства) расстояние между точками пересечения двух приведенных мировых линий вдоль текущей изохроны Вселенной изменяется *равномерно и прямолинейно*. Тем самым, как уже было отмечено, представление об инерциальном движении переводится из априорного (и часто приводящего к порочному кругу определений) во вторичное, которое непосредственно и естественно вытекает из порождающей его исходной модели.

Мы снова можем отметить существование естественного ограничения на возможный угол отклонения мировой линии от нормали к изохроне; очевидно, этот угол не может быть больше прямого, что, бесспорно, увязывается с наличием предельной скорости движения, равной упомянутой выше величине c . Отношение v/c скорости v движения частицы к скорости света оказывается мерой (синусом) угла отклонения вектора 4-мерного перемещения от нормали к изохроне. *Особо важным является то, что эта мера неаддитивна: при сложении углов результирующая относительная скорость не равна сумме относительных скоростей.* Наконец, понятно, что движение с предельной скоростью c (скоростью света) происходит *вдоль изохроны* – *текущего* сечения Вселенной, перпендикулярно к ее радиусу.

Мы теперь можем приступить к установлению соответствия между СТО и ТШРВ. При этом необходимо проводить четкое различие между обычной системой координат (“время-перемещение”) и используемой в ТШРВ системой “нормаль-изохрона” (речь идет о поверхности 4-сферы). Именно последняя - вновь введенная - система координат позволит нам избежать привлечения концепции псевдоевклидовой метрики, лежащей в основе формализма Минковского.

Как мы видели выше (в подразделе 2.4), последовательность вложенных гиперповерхностей фактически определяет течение *абсолютного* времени в рамках СТО (см. рис. 5.2а, повторяющий рис. 2.6). На рис. 5.2б показан один из световых конусов, лежащих в области будущего, а также приведены мировые линии частиц, летящих с разными скоростями из начальной точки O ; по оси ординат отложено время t , по оси абсцисс - перемещение x . Для всех точек конуса выполняется условие $c^2 t^2 - x^2 = \text{const}$.

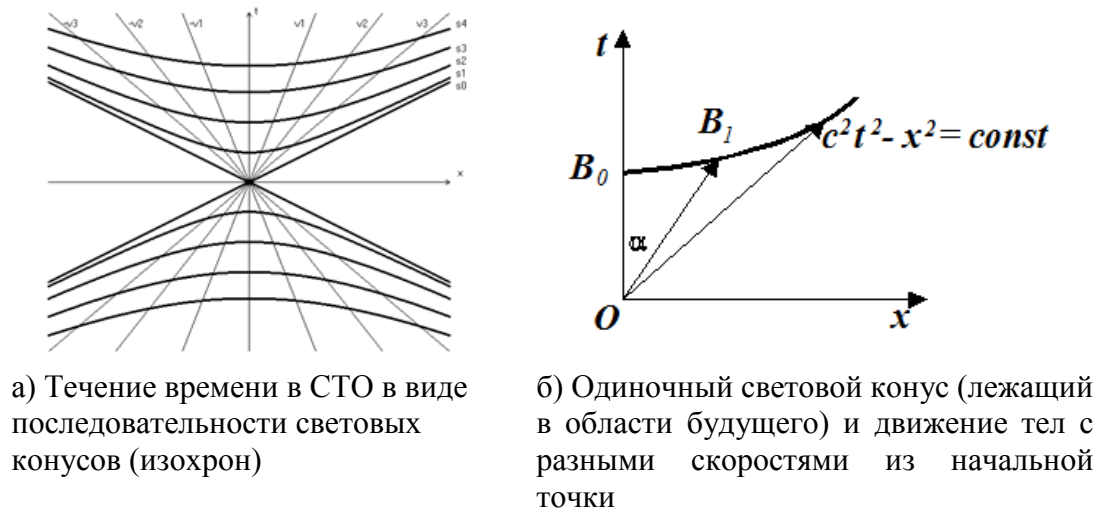


Рис. 5.2. Течение времени и движение тел в СТО

Внутренней прямой линией под углом $\alpha < 45^\circ$ к оси времени изображена мировая линия частицы (от события O до события B_1), скорость которой меньше скорости света. Для такой линии угол α отклонения вектора скорости от оси времени будет меньше 45° ; этот угол определен соотношением

$$\operatorname{tg} \alpha = x/(c \cdot t) = v/c$$

Интересно, что с чем большей скоростью покидает тело начальную 4-точку O , тем больше (по часам неподвижного наблюдателя) понадобится времени телу для достижения поверхности данного светового конуса (разумеется, свет будет испущен *позже* начала движения тела, из 4-точки B_0), и тем больше окажется пройденное телом расстояние.

Перейдем теперь к построениям в ТШРВ. Как изобразить в системе “нормаль-изохрона” то, что ранее было построено в системе “время-перемещение”?

Прежде всего условимся в соответствии с рис. 5.1 изображать изохроны линиями, параллельными оси абсцисс. Далее, по вертикальной оси будем откладывать величину 4-интервала (в терминологии СТО), деленного на скорость света, или абсолютного времени (в терминологии ТШРВ). Таким образом, расстояние между указанными поверхностями, деленное на скорость света, для *неподвижного* наблюдателя в СТО будет совпадать с промежутком абсолютного времени между соответствующими изохронами. Кроме того, отметим на рис. (б) те же значения времени и перемещения $\{t_i, x_i\}$, что и на рис. (а).

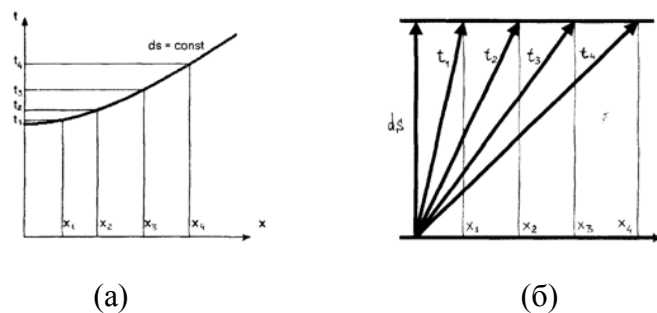


Рисунок 5.3. Переход от системы координат “перемещение-время” (а) к системе “нормаль-поверхность” (б).

Спрашивается, как соотносятся между собой угол поворота α в системе “время-перемещение” (СТО) и угол φ отклонения вектора 4-мерного перемещения (с определенной скоростью, см. рис. 5.1) от кратчайшего 4-мерного пути (с нулевой скоростью) между сечениями Вселенной (в системе “нормаль-изохрона”)? Легко видеть, что угол φ на рис. 5.1 не равен углу α на рисунке 5.2; действительно, когда первый стремится к 90° , второй стремится к 45° . С учетом определений углов мы можем заключить, что $\operatorname{tg} \alpha = \sin \varphi$.

Нетрудно заметить, что в системе “нормаль-изохрона” скорость соответствует именно синусу угла φ , т.е. к отношению пройденного пути к величине времени, измеренного *неподвижным* наблюдателем: когда скорость стремится к скорости света, путь (в световых единицах расстояния) стремится к величине затраченного на это времени. В системе же отсчета движущегося с такой скоростью путешественника *собственное* время стремится к нулю (как $\cos \varphi$).

И в системе координат “нормаль-изохрона” также справедливо утверждение: чем с большей скоростью покидает тело начальную изохрону, тем больше понадобится времени телу для достижения поверхности последующей изохроны, и тем больше окажется пройденное телом расстояние.

Между углами α и φ заведомо установлено взаимно-однозначное соответствие, так что переходу от одного вектора 4-мерного перемещения к другому в системе “нормаль-изохрона” всегда отвечает совершенно определенное преобразование Лоренца (в системе “время-перемещение”). При этом в СТО инвариантом служит интервал, а в ТШРВ, как легко видеть из рис. 5.1 - промежуток абсолютного времени (расстояние) между изохронами.

Мы, таким образом, получили наглядную интерпретацию преобразования Лоренца средствами чисто евклидовой (а не псевдоевклидовой) геометрии, причем во вновь введенной системе координат аргумент преобразования определяется не через гиперболический арктангенс (как в СТО), а через обычный арксинус скорости. При этом необходимость в использовании (и физической интерпретации) мнимых отрезков и углов, вообще говоря, отпадает.

С другой стороны, в некоторых случаях использование системы координат “нормаль-изохрона” менее наглядно. Так, в этой системы свет распространяется вдоль изохрон, которые перпендикулярны мировым линиям неподвижных частиц и разделены фиксированными значениями 4-интервала. Поэтому увидеть динамические траектории фотонов в этой системе невозможно²³, тогда как стандартное представление СТО (т.е. использование угла α вместо φ , рис. 5.1 и 5.2б) позволяет легко сопоставить мировую линию частицы и образующие световых конусов, например, при анализе глобальной эволюции Вселенной.

Сравним некоторые характерные случаи, представленные, соответственно слева и справа на рис. 5.4 в СТО и в ТШРВ. На диаграмме (а) изображена ситуация, когда группа частиц, в одно и то же время (но с различными скоростями) покинувших начальную точку, *одновременно* (с точки зрения *неподвижного* наблюдателя СТО) достигнет ряда *различных* изохронных поверхностей. Соответственно и в ТШРВ концы перемещений, лежащих на окружности постоянного радиуса, принадлежат *разным* изохронам, т.е. *различным* сечениям Вселенной. Как получить соответствующую диаграмму? Каждому значению скорости отвечает свое значение угла φ . Поэтому в данном случае справедливо условие $x = t \sin \varphi$, что и соответствует окружности (в функции угла φ). На диаграмме (б) изображена ситуация, когда группа частиц, в одно и то же время покинувших начальную точку, достигает *различных* изохронных поверхностей в точках, удаленных (с точки зрения неподвижного наблюдателя СТО) *на одно и то же* расстояние от этой начальной точки. Соответственно и в ТШРВ концы перемещений,

²³ В июле 2013 г. я пришел к пониманию того, что динамическая траектория фотона – это не линия, а нелокальная область, пространственная протяженность которой отвечает расстоянию l между источником и поглотителем поля, а размер области во времени в точности соответствует значению $\tau = l/c$, так что скорость передачи информации фотоном как раз равна скорости света c (как если бы она переносилась вдоль мировой по диагонали этой нелокальной области).

лежащих на одной и той же вертикали, принадлежат *разным* изохронам, т.е. *различным* сечениям Вселенной.

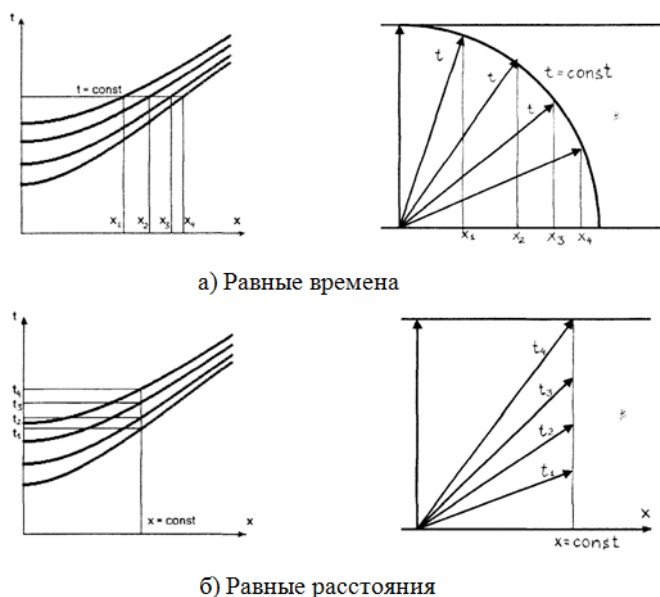


Рис. 5.4. Сопоставление представлений в СТО и в ТШРВ

5.2. Масса, энергия и импульс частиц

Когда мы рассматриваем Вселенную, как расширяющуюся 3-мерную гиперповерхность 4-мерного шара, то места локализации масс материальных частиц во Вселенной представляют собой точки пересечения этой гиперповерхности с мировыми линиями. Тем самым мировым линиям приписывается физический, а не абстрактный иллюстративный смысл. Уместно ожидать, что этот физический смысл может проявляться более существенным образом, нежели на уровне простой словесной констатации.

В частности, при глобальном рассмотрении Вселенной мы можем предположить, что такая фундаментальная характеристика частицы, как ее масса покоя, является некоторой относительной величиной. Такое отношение могло бы быть составлено, например, из радиуса 4-мерного шара-Вселенной и некоторого характерного размера, объективно связанного с физическими свойствами частицы.

Напомним теперь, что каждой частице с энергией E и импульсом P может быть сопоставлена волна де Бройля с периодом колебаний τ и длиной λ , причем:

$$E = h/\tau, P = h/\lambda$$

где h - постоянная Планка.

Выразив минимально возможные значения энергии E_0 и импульса P_0 через радиус кривизны Вселенной R , получим:

$$E_0 = c \cdot h/R, P_0 = h/R$$

и для любой частицы с энергией E и импульсом P найдем:

$$E/E_0 = R/(c \cdot \tau), P/P_0 = R/\lambda$$

Но отношения, стоящие в *левой* части каждого равенства, пропорциональны инертной массе частицы ***m***; в *правой* же стороне каждого из равенств стоит характерное соотношение между длиной волны де Бройля и радиусом кривизны Вселенной. Таким образом, *масса оказывается квантовым числом*, определяющим кратность волны де Бройля по отношению к базовому геометрическому параметру Вселенной, причем минимальная масса покоя (отвечающая энергии первой гармоники кривизны) равна:

$$m_0 = h / (R \cdot c) = h \cdot H / c^2$$

Эта величина крайне мала²⁴, порядка 10^{-66} г, тогда как масса электрона составляет около 10^{-27} г, масса бариона – около 10^{-24} г.

Теперь нам предстоит сделать важный шаг. Мы определили "текущую" массу частицы через отношение радиуса кривизны Вселенной к длине волны де Бройля. Но с течением времени радиус Вселенной возрастает. Как же ведет себя масса в целом?

Если бы длина волны де Бройля также возрастала пропорционально этому радиусу, мы, повидимому, вообще не смогли бы обнаружить изменение размеров Вселенной, в том числе и знаменитого "красного смещения". Мне кажется логичным признать, что волновые параметры частиц неизменны. Этот факт может рассматриваться как подтверждения тезиса о том, что масса материи растет прямо пропорционально размеру и возрасту Вселенной.

Пусть $v_x = dx/dt$, $v_y = dy/dt$, $v_z = dz/dt$ – компоненты обычной 3-мерной скорости ***v***. В СТО (система координат "время-перемещение") вводится определение псевдоевклидова вектора нормированной 4-мерной скорости частицы – он направлен вдоль мировой линии частицы, его длина равна единице по определению. Умножив все компоненты этого вектора на величину скорости света ***c***, представим полученный вектор в виде:

$$\mathbf{u}^* = \{c/(1-v^2/c^2)^{1/2}, iv_x/(1-v^2/c^2)^{1/2}, iv_y/(1-v^2/c^2)^{1/2}, iv_z/(1-v^2/c^2)^{1/2}\}$$

Из выражения для компонент вектора $\mathbf{u}^*$ легко найти, что $(\mathbf{u}^*)^2 = c^2$.

В рамках нашей евклидовой модели (система координат "нормаль-поверхность") логично считать $\mathbf{u}^*$ не полной 4-скоростью, а ее проекцией на ось абсолютного времени. Тогда полная скорость ***u*** представляется вектором

$$\mathbf{u} = \{c, v_x/(1-v^2/c^2)^{1/2}, v_y/(1-v^2/c^2)^{1/2}, v_z/(1-v^2/c^2)^{1/2}\},$$

а ее модуль будет равен величине $c/(1-v^2/c^2)^{1/2}$. Основанием для использования подобного вектора в ТШРВ может служить рис. 3.3. Действительно, если на этом рисунке положить $t_0=1$, то вертикальный и горизонтальный катеты этого треугольника будут равны соответственно ***c*** и $v/(1-v^2/c^2)^{1/2}$, а гипотенуза – $c/(1-v^2/c^2)^{1/2}$. Легко проверить, что синус угла φ отклонения от нормали будет при этом равен v/c . Таким образом, эти величины возникают в нашей модели весьма естественным образом.

Далее, в СТО (система координат "время-перемещение") с помощью компонент вектора $\mathbf{u}^*$ строится 4-мерный псевдовектор энергии-импульса

$$\{T^*\} = \{E_{\text{полн}}/c, iP_x, iP_y, iP_z\},$$

²⁴ Как я узнал в 2008 г., очень близкое значение "кванта массы" – около 10^{-66} г – получил Wesson из соображений размерностей по формуле

$$m_p = (h/c)/(\Lambda/3)^{1/2}$$

где Λ – гипотетическая космологическая постоянная (см. [Вессон, 2003]). Совпадение неслучайно, если учесть выведенное нами в подразделе 3.10 соотношение $R = (\Lambda/6)^{-1/2}$.

длина которого всегда равна mc , а пространственные компоненты выражаются через соответствующие компоненты вектора скорости:

$$P_x = mv_x / (1 - v^2/c^2)^{1/2}, \quad P_y = m v_y / (1 - v^2/c^2)^{1/2}, \quad P_z = m v_z / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$$

Соответственно, в нашей модели (система координат “нормаль-поверхность”) логично рассматривать чисто евклидовый 4-вектор энергии-импульса T , представленный в виде:

$$\{T\} = \{mc, P_x, P_y, P_z\},$$

длина которого равна $E_{\text{полн}} / c$. Таким образом, переходя от пространства Минковского к рассматриваемому нами 4-мерному евклидовому пространству, мы можем вывести тривиальное заключение, что полная механическая энергия $E_{\text{полн}}$ оказывается естественной мерой длины обычного вектора, поскольку

$$E_{\text{полн}}^2 = (mc^2)^2 + (Pc)^2,$$

а энергия покоя mc^2 есть проекция этого вектора на ось абсолютного времени, т.е. нормаль к 3-мерной изохроне. Следовательно, полная энергия механического движения в новой физической концепции определяется как углом отклонения мировой линии от нормали к сечению Вселенной (скоростью частицы), так и отношением радиуса 4-мерного шара к длине волны де Бройля (массой покоя частицы). Пока угол отклонения от нормали, т.е. скорость частицы, остается без изменения, мы можем говорить о равномерном, строго инерциальном движении, поскольку энергия покоя остается неизменной.

Разумеется, при этом сохраняются все известные результаты СТО, в частности, в первом приближении механическая энергия оказывается простой суммой энергии покоя и классической кинетической энергией. Как и должно быть, для движущейся частицы эта полная энергия механического движения всегда больше энергии покоя и равна:

$$E_{\text{полн}} = mc^2 / (1 - v^2/c^2)^{1/2} \cong mc^2 + m \cdot v^2/2$$

В специальной теории относительности состояние частицы при *инерциальном* движении полностью характеризуется именно вышеописанным псевдовектором энергии-импульса, который *сохраняется* при переходе к другой инерциальной системе, т.е. при параллельном сдвиге или повороте координатных осей. Инвариантность при сдвиге вдоль оси времени отвечает сохранению энергии, при сдвиге вдоль пространственных осей – сохранению импульса (однородность времени и пространства). Инвариантность при вращении в чисто пространственной плоскости отвечает сохранению момента импульса (изотропность пространства). Что же касается вращения в “смешанной” плоскости, образованной осью времени и одной из пространственных осей, то оно отвечает соответствующему преобразованию Лоренца – это очевидное следствие соединения в общий четырехмерный континуум трехмерного пространства с независимым в прежней теории одномерным временным континуумом. Изотропность поворота в смешанной плоскости ограничена, поскольку движение вспять во времени невозможно.

Предложенная мной теория в первом приближении (когда абсолютная скорость движения, т.е. угол отклонения от нормали к изохроне, имеет малую величину) приводит к тем же соотношениям, что и СТО. Однако при больших значениях абсолютной скорости преобразования Лоренца оказываются не вполне адекватными действительности.

5.3. Относительность и абсолютность движения

Принцип относительности Эйнштейна декларирует полное равноправие всех *инерциальных* систем. Напомним, что его концептуальное обоснование изначально было принято строить на двух положениях. Во-первых, исходя из опытов Майкельсона-Морли, констатировалось выполнение соотношения $cdt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2) = 0$ при распространении светового сигнала в *произвольной* системе отсчета. Во-вторых, делалось не основанное непосредственно на опыте допущение, что левая часть этого равенства сама по себе (т.е. при любом ее значении) также имеет одну и ту же величину в любой инерциальной системе отсчета, т.е. является инвариантом преобразования Лоренца. Справедливость этого допущения оправдывалась апостериори успешными теоретическими предсказаниями теории относительности.

Из сказанного вытекает, что в принципе допустимы логические попытки построить новую физическую модель, в которой справедливо лишь первое равенство, тогда как второе утверждение в общем случае выполняется не строго, а лишь в достаточном приближении.

С другой стороны, универсальность принципа относительности вызывает принципиальные сомнения в связи с его непригодностью для огромного класса явлений, связанных с неинерциальным (например, с вращательным) движением. Точно так же и в электродинамике, вопреки часто бытующему представлению, уравнения Максвелла строго ковариантны только для равномерно движущихся, но не для ускоренных тел. Цитируя это утверждение В.Паули и А.Эйнштейна, Г.И.Шипов в современной работе [Шипов, 1993] выводит условие, определяющее необходимую степень малости безразмерного ускорения. Из него следует, что и в сильных электромагнитных полях, и при ультрарелятивистских скоростях заряженных частиц специальный принцип относительности в электродинамике (как классической, так и квантовой) нарушается.

Как отмечалось выше, при наличии вращения в общем случае становится неправомерным использование принципа эквивалентности, лежащего в основе ОТО. Но неправомерностью применения принципа эквивалентности в данном случае дело не ограничивается. Понятно, что динамические эффекты, связанные с вращением, позволяют в принципе указать выделенную (абсолютную) систему отсчета, т.е. опять-таки ставят под сомнение и принцип относительности. Поэтому мы сталкиваемся с необходимостью пойти по одному из трех возможных путей:

- найти способ обобщить принцип относительности на вращающиеся системы отсчета
- признать несостоятельность принципа относительности
- предложить приемлемую схему модификации использования принципов эквивалентности и относительности.

По первому пути пошел Г.И.Шипов [Шипов, 1993]. Однако за подобное обобщение ему потребовалось заплатить довольно высокую цену – от геометрии 4-мерного (риманова) пространства он был вынужден перейти к геометрии более сложного 10-мерного пространства абсолютного параллелизма, в котором к четырем обычным пространственным координатам добавлены три угла Эйлера и три компоненты вектора ориентации точки. Решающим критерием истинности этого выбора должна стать практика, однако пока что правота Г.И.Шипова не получила общего признания.

Второй путь – простое отрицание принципов эквивалентности и относительности – вряд ли имеет шансы на успех спустя почти столетие после триумфа теории Эйнштейна и ее несомненных достижений в области астрофизики и космологии. Очевидно, речь в лучшем случае могла бы идти лишь о том, чтобы указанные принципы выступали в роли приближенных, точность которых определяется количественными критериями их справедливости.

Я надеюсь, что излагаемая здесь теория представляет собой конструктивную реализацию третьего пути. Она дает основания усомниться в строгой справедливости принципа относительности. Действительно, в СТО принято считать совершенно равноправными точки зрения двух движущихся один относительно другого наблюдателей (см. рис. 5.5).

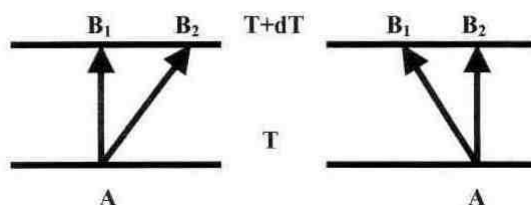


Рис. 5.5. Относительность систем отсчета с точки зрения СТО

Но если мы опираемся на модель концентрических сечений Вселенной, то не можем допустить, чтобы угол наклона пересекающего их вектора был величиной относительной! Как же обстоит дело с точки зрения ТШРВ? В предлагаемой модели Вселенной, как и в СТО, течение времени различается в (абсолютно) покоящейся и в движущихся системах отсчета, *но это различие носит абсолютный характер*. Чем больше скорость движущейся системы отсчета по отношению к абсолютно неподвижной, тем медленнее течет время в этой движущейся системе. Следовательно, наиболее быстро течет время в абсолютно неподвижной системе отсчета; в системе, движущейся со скоростью света относительно абсолютно неподвижной, течение времени останавливается.

Предположим (это предположение обсуждается в следующем подразделе), что Земля абсолютно неподвижна или движется крайне медленно относительно абсолютно неподвижной системы отсчета. В этом случае, так же, как и в СТО, Землянину кажется, что его часы идут быстрее, чем часы Космонавта (т.е. что он, Землянин, стареет быстрее Космонавта). Заметим, что *экспериментально* проверялись до сих пор как раз только такие ситуации. Обратное же, вопреки СТО и согласно ТШРВ, неверно: Космонавт *также* считает, что часы Землянина идут быстрее, тогда как в соответствии со СТО его мнение должно быть *противоположным*. Аналогичным образом, время в системе отсчета, связанной с быстрыми космическими частицами (мюонами), замедляется не только с точки зрения земного астрофизика, но в собственной системе отсчета таких частиц.

Реальное сравнение темпов течения времени в двух строго *инерциальных* системах отсчета невозможно – необходимо, чтобы их мировые линии пересеклись в двух различных 4-точках, т.е. чтобы хотя бы одна из них отличалась от прямой. В стандартной формулировке парадокса близнецов их возраст сравнивается на Земле, которую мы будем считать практически абсолютно неподвижной. Вопрос состоит в том, получим ли мы *полностью идентичный* эффект в случае, когда близнецы расстаются (а потом встречаются) не на Земле, а в достаточно быстро летящей ракете.

Итак, процесс *непосредственного измерения* конкретной скорости с помощью часов и линейки в ТШРВ как будто бы не позволяет непосредственно выделить систему отсчета наблюдателя по сравнению с движущейся относительно него другой инерциальной системой. Однако взгляд, брошенный на рис. 5.6, дает основание думать, что такое различие все же объективно существует и, следовательно, хотя бы каким-либо *косвенным* образом могло бы быть установлено.

Чтобы лучше осмыслить ситуацию, рассмотрим пример из школьной (классической) физики. Пусть наблюдатель живет на маленьком острове среди безбрежной морской глади и измеряет скорость проходящих мимо пароходов. Для определенности будем считать, что каждый пароход проходит через участок эталонной длины, так что нашему наблюдателю достаточно только включить и выключить секундомер в соответствующие моменты времени.

Пока наш наблюдатель осуществляет каждое измерение независимо от всех остальных, никаких проблем у него не возникает, и на досуге он даже может пофилософствовать о том, что

скорость парохода относительно него самого равна скорости наблюдателя относительно парохода.

Однако в один прекрасный день наш наблюдатель видит знакомый пароход, который теперь уже следует в обратную сторону. Из любопытства заглянув в старые записи, наблюдатель определяет, что скорость парохода в обратном рейсе *иная*, нежели в прямом. Любопытный наблюдатель спрашивает по радио капитана парохода, в чем причина различия. Но капитан отвечает, что режим работы двигателя тот же самый, а значит и скорость должна быть точно такой же.

Задумавшись, наш наблюдатель приходит к гипотезе о том, что (если капитан говорит правду) в море есть течение, скорость которого в одном случае складывается со скоростью парохода, а в другом случае вычитается из нее. Настойчивый наблюдатель просматривает свои записи за длительный период, выписывает для каждого корабля (обладающего своей индивидуальной, но неизменной скоростью) соответствующие записи, проделявает расчеты и убеждается в том, что все становится на свои места, *если в каждом случае приписать скорости течения одно и то же значение!*

Мораль, вытекающая из приведенного примера, такова. Одиночные измерения не позволяют наблюдателю установить наличие некоторого течения, универсальным образом влияющего на результаты всех измерений. Однако сопоставление результатов *многих* измерений, использование некоторой *априорной* информации (неизменность скорости каждого парохода относительно течения) позволяет вывести проверяемую (в новых, специально проведенных экспериментах) гипотезу, устанавливающую наличие такого течения. Если бы наш наблюдатель сразу безоговорочно поверил бы капитану, как если бы тот был *демоном* (или демиургом, или еще каким либо сверхъестественным существом, *знающим истину*), то он уже после двух экспериментов мог бы разгадать загадку!

Обратимся теперь к рис. 5.6. Пусть наш ТШРВ-наблюдатель *на самом деле* перемещается во времени (вследствие расширения Вселенной) от изохроны T до изохроны $T+dT$ по прямой AB . Он наблюдает движение двух удаляющихся от него в противоположных направлениях тел (одинаковых пароходов), которые *на самом деле* перемещаются во времени от изохроны T до изохроны $T+dT$ по прямым AB_1 и AB_2 соответственно. Дальше на усмотрение читателя предлагается любой из двух вариантов с участием *демона*.

Либо после измерения наш наблюдатель с помощью линейки устанавливает, что отрезки B_1B и BB_2 равны, а *демон* утверждает, что углы B_1AB и $BA B_2$ не равны. Либо наоборот, наш наблюдатель с помощью линейки устанавливает, что отрезки B_1B и BB_2 не равны, а *демон* утверждает, что углы B_1AB и $BA B_2$ равны. *Демон* ведь *знает*, что угол между изохроной и мировой линией наблюдателя AB отличен от прямого!

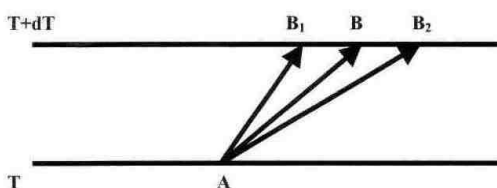


Рис. 5.6. Метод установления абсолютной системы отсчета

Ну, хорошо, - возразит читатель - ведь в действительности такого *демона* не существует! Я со вздохом соглашусь с читателем и отвечу, что, конечно, не существует, поэтому нам придется-таки проделать много-много измерений и использовать некоторую *априорную* информацию или информацию, априорно представляющуюся убедительной.

Оставим на короткое время нашего *демона* и обратимся к вопросу о погрешности, вносимой специальной теорией относительности в том случае, если абсолютная система отсчета действительно существует. Тогда инвариантность 4-мерного интервала в рамках ТШРВ точно выполняется лишь по отношению к *абсолютно неподвижному* наблюдателю. Если же,

например, сам наблюдатель движется с некоторой абсолютной скоростью v в плоскости xt , то вместо инвариантного выражения для длины 4-мерного перемещения

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2$$

возникает, как можно показать, соотношение

$$ds^2 (1 + \sigma^2) = c^2 dt^2 - dx^2 - 2\sigma ds dx$$

где

$$\sigma = (v/c) / (1 - v^2/c^2)^{1/2} = \beta / \sqrt{1 - \beta^2} = \operatorname{tg} \varphi$$

5.4. О реальном существовании абсолютной системы отсчета

Вернемся к нашему *демону*. Необходимую информацию Создатель предоставил нам в действительности значительно раньше, чем сподобил меня придумать ТШРВ. Роль огромного числа одинаковых пароходов, идущих к нам с одинаковой скоростью (скоростью света) со всех сторон Вселенной, играют фотоны так называемого *реликтового* излучения (считается, что это излучение – остаток древней Вселенной).

Роль *демона* выполняет наша уверенность в полной изотропности Вселенной, что подкрепляется точнейшими многолетними результатами независимых измерений *температуры* этого излучения как функции направления, по которому к нам летят фотоны. *Но оказывается, что имеется малая (порядка 10^{-3}) дипольная анизотропия, которая объяснима, если принять, что мы движемся по направлению к созвездию Льва со скоростью порядка 400 км/с!*

В комментарии к русскому переводу книги [Вайнберг, 2000] ее редактор Я.Б. Зельдович писал:

На этом примере выясняется, что в каждой точке Вселенной существует наблюдатель, относительно которого микроволновое излучение изотропно. Этого наблюдателя и связанную с ним систему координат можно назвать выделенными ... Наличие в каждой точке выделенной системы координат напоминает взгляды физиков до создания теории относительности, когда предполагалось, что свет - это колебания особого вещества - эфира, заполняющего всю Вселенную. Предполагалось далее, что система координат, связанная с эфиром, является преимущественной, выделенной, и ставились опыты по обнаружению движения Земли относительно эфира. Мы знаем, что эти опыты (Майкельсона и других) дали отрицательный результат - светонесущий эфир не существует. Однако эволюция Вселенной приводит к тому, что в наблюдениях космического микроволнового излучения (но только в этих астрономических наблюдениях!) выделенная система появляется, и ее иногда называют "новый эфир" ... в расширяющейся Вселенной новый эфир в одном месте движется относительно нового эфира в другом месте. Именно новый эфир или, другими словами, микроволновое излучение с наибольшей точностью осуществляет движение по закону Хаббла.

Запущенный 18 августа 1989 года спутник COBE (Cosmic Background Explorer), разработанный Центром космических полетов Годдарда Национального Аэрокосмического Агенства (NASA)²⁵, позволил надежно подтвердить этот результат. Спектр космического

²⁵ Приведенная здесь информация подготовлена Центром космических полетов Годдарда, NASA, США (Goddard Space Flight Center) под руководством COBE Science Working Group и была предоставлена NSSDC.

микроволнового фонового излучения был измерен с точностью 0.005%; было обнаружено, что этот фон имеет значимую анизотропию на относительном уровне порядка 10^{-5} .

На рис. 5.7 показана карта отклонений температуры излучений от средней величины (2.728 K) в микроволновой части спектра. Слоистая структура карты соответствует анизотропии дипольного вида, что является проявлением эффекта, связанного с движением Солнца относительно среды, в которой распространяется микроволновое фоновое излучение.

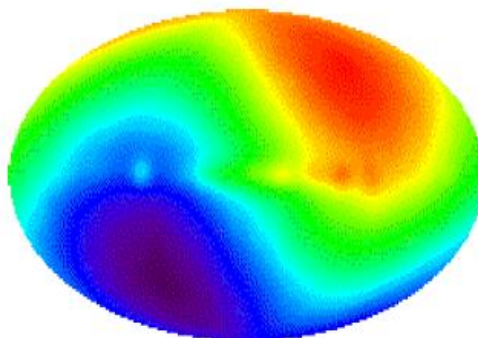


Рис. 5.7. Дипольная анизотропия фонового космического излучения

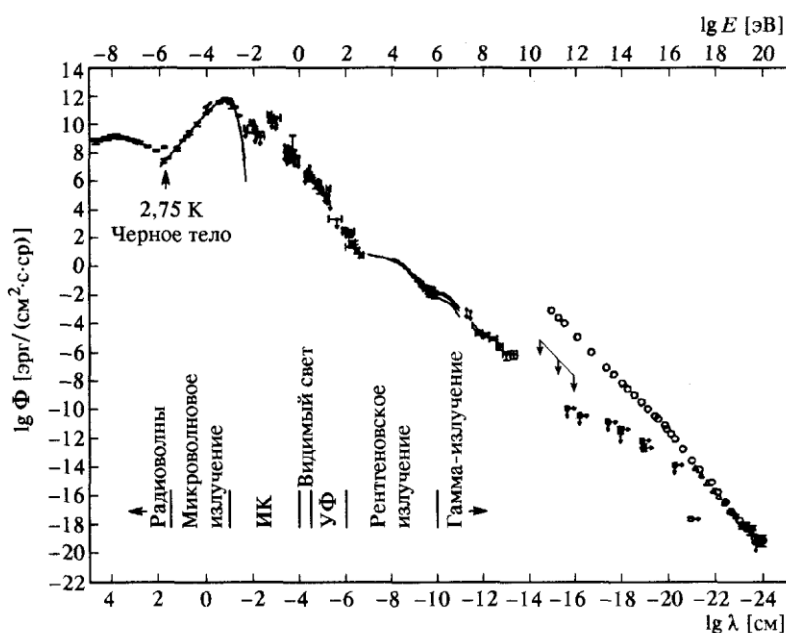


Рис. 5.8. Полный спектр рассеянного фонового излучения, наблюдаемого в спектральной области $10^5 \text{ см} \geq \lambda \geq 10^{-24} \text{ см}$ [Клапдор-Клайнгротхаус, Цюбер, 2000]

Помимо инфракрасной компоненты, было также исследовано космическое фоновое излучение в гораздо более широком спектре. Начиная с 1990 г. с помощью ряда спутников изучается область рентгеновского и гамма-излучения. Наблюдаемая в рентгеновских лучах дипольная анизотропия в пределах погрешностей измерений точно соответствует дипольной анизотропии фонового 3К-излучения, что подтверждает ее интерпретацию как эффекта Доплера (см. рис. 5.8, заимствованный из [Клапдор-Клайнгротхаус, Цюбер, 2000]).

Итак, согласно предложенной в ТШРВ концепции, в каждой точке Вселенной *должно* существовать свое уникальное пространственное направление и уникальное значение скорости движения в этом пространственном направлении, определяющее выделенную систему отсчета (фактически это есть 4-мерная “стрела времени”). Этот результат был получен мною *до того*, как я узнал о вышеописанном экспериментальном открытии. Поэтому возник вопрос о дальнейшем экспериментальном подтверждении (или опровержении) новой теории.

Мое объяснение вышеописанного явления анизотропии таково. Любое ускоренное (в том числе вращательное и колебательное) движение в общем случае выделяет абсолютную систему отсчета. Поскольку любое электромагнитное излучение генерируется колеблющимися электрическими зарядами, то тем самым оно принципиально позволяет наблюдателю выделить абсолютную систему отсчета.

Если наблюдатель абсолютно неподвижен (“дрейфует” вдоль нормали к изохронной Вселенной при ее расширении, см. [Шульман, 2006]), то относительно него излучение будет идеально изотропным. Если же мировая линия наблюдателя образует ненулевой (хотя и постоянный) угол с осью абсолютного времени, то такой движущийся наблюдатель (и именно с помощью эффекта Доплера) сможет определить абсолютную скорость своего движения, детектируя анизотропию этого излучения, которая обусловлена направлением и скоростью движения измерительного устройства относительно выделенной системы отсчета. Количественно эта анизотропия будет определяться отношением скорости движения к скорости света (по современным данным, $v/c \sim 0.0015$) и углом α относительно выделенного направления движения.

В предшествующей версии данного текста я ошибочно предлагал использовать измерения спектра солнечного света в различные моменты движения Земли по околосолнечной орбите, либо взаимно неподвижную систему “источник света – спектроанализатор”. Однако независимо друг от друга два серьезных специалиста-экспериментатора выразили сомнение в том, что такой предполагаемый эффект мог бы оказаться незамеченным до сих пор. Это заставило меня переосмыслить ситуацию и понять, что Земля вместе с Солнцем (или предлагавшимся источником света) движется относительно абсолютной системы отсчета, так что никакого эффекта заметить будет *нельзя*. Но затем я пришел к выводу, что какого-то *реального* дополнительного эксперимента вообще не требуется, вполне можно ограничиться экспериментом *мысленным*. В самом деле, пусть имеется источник света, *неподвижный относительно реликтового излучения*, т.е. относительно абсолютной системы отсчета. Но тогда этот источник будет двигаться относительно Земли, и земной наблюдатель, естественно, обнаружит доплеровское смещение его частоты. Иными словами, не только глобальное изотропное реликтовое излучение (которое выделял в качестве исключительного феномена академик Зельдович), но и излучение любого *локального* источника электромагнитных волн даст для земного наблюдателя аналогичный доплеровский эффект!

Я также думаю, что в принципе возможны и чисто механические эксперименты. Дело в том, что в релятивистской механике сила зависит от угла между векторами ускорения и скорости. В частном случае, когда скорость частицы изменяется только по величине, т.е. сохраняет свое направление (например, по оси x) выражение для силы равно:

$$dP/dt = mv / (1 - v^2/c^2)^{-3/2} dv/dt$$

В другом частном случае, когда скорость меняется только по направлению ($v^2 = \text{const}$), т.е. перпендикулярна силе, имеем

$$dP/dt = mv / (1 - v^2/c^2)^{-1/2} dv/dt$$

Однако в теории относительности скорость системы отсчета может выбираться произвольно, в частности – нулевой, тогда соответствующий множитель в любом случае оказывается равным единице. Напротив, в ТШРВ в вышеприведенных формулах фигурирует *абсолютная* скорость, определяемая углом отклонения мировой линии частицы от нормали к изохроне. Это означает, что если Земля движется с определенной скоростью $v_{\text{абс}}$ относительно абсолютно неподвижной (выделенной) системы отсчета, то измеряя отношение силы к ускорению в направлении указанной скорости и в перпендикулярном ему направлении, можно экспериментально подтвердить наличие этой абсолютной скорости! Если подобная скорость действительно определяется величиной и направлением, следующими из эффекта анизотропии

фоновое космическое излучения (см. следующий раздел), то при одной и той же по (модулю) силе можно рассчитывать на относительное различие продольного и поперечного ускорения порядка $2,25 \times 10^{-6}$.

Возможны опыты, дающие, например, в соответствующем направлении малое отклонение оси гироскопа от традиционно ожидаемого, однако пока такие эффекты не рассчитывались. Аналогичным образом, эксперименты типа маятника Фуко (если бы вектор абсолютной скорости удачно оказался направленным так, чтобы в максимальной степени складываться и вычитаться с вектором скорости движения маятника) могли бы привести к определенному отклонению вращения плоскости колебаний от той, что определена исключительно вращением Земли.

Имеет смысл подчеркнуть, что в отличие от парадигмы “старого эфира” выделенная система отсчета “нового эфира” связана не только с *определенным направлением* во Вселенной, которое выделялось бы в ходе экспериментов подобно тому, как стрелка компаса указывает на север. Эта выделенная система связана еще и с *определенной 3-мерной скоростью* движения в этом направлении. В совокупности же таким образом выделяется 4-мерный вектор нормали к сферической гиперповерхности шара - Вселенной.

5.5. Абсолютная система отсчета и парадокс близнецов

В 2009 году в Архиве появилась статья [Abramowicz and Bajtlik, 2009], посвященная парадоксу близнецов. В ней производится сравнение классической версии парадокса близнецов со случаем движения близнецов по общей круговой орбите, но с различной угловой скоростью. Классическую версию (прямолинейное равномерное движение) парадокса авторы описывают следующим образом (перевод мой – МХШ):

Часто утверждается, что решение классического парадокса близнецов заключается в учете ускорения близнеца-“путешественника”: он должен ускоряться, чтобы вернуться и встретиться со своим никогда не испытывавшим ускорения братом, причем *моложе* оказывается близнец, испытывавший ускорение.

Далее авторы рассматривают движение близнецов с различными скоростями по общей *круговой* орбите относительно некоторого центра. Периодически один близнец догоняет другого, так что они встречаются. Общеизвестный анализ ситуации в *системе отсчета, жестко связанной с центром вращения*, показывает, что *медленнее* стареет (т.е. окажется моложе) тот из них, кто обладает *большой* скоростью в данной системе отсчета.

Пусть скорость его вращения равна кеплеровой, т.е. такой, что он благодаря своей скорости совершает свободное падение к центру, бесконечно долго оставаясь на стационарной орбите (при этом его кинетическая энергия равна потенциальной). Тогда жестко связанную с ним систему отсчета можно считать инерциальной, а второй близнец будет описывать относительно него сложную траекторию и, следовательно, обладать ненулевой 3-скоростью и ненулевым 3-ускорением. Таким образом, в этой системе отсчета

... при встрече *испытывающий ускорение близнец оказывается старше своего брата*, который не испытывает ускорения!

Это различие между прямолинейным и вращательным движением побуждает авторов сделать вывод, что замедление времени зависит в общем случае только от соотношения скоростей, но не от факта ускорения того или иного из близнецов.

Однако здесь возникает вопрос, в какой системе отсчета следует определять эти две скорости – в системе отсчета А, в системе отсчета В или еще в какой-либо иной? Для прямолинейного равномерного движения в пространстве-времени Минковского данный вопрос не имеет реального значения, поскольку в этом случае близнецы пересекаются в одной точке не

более одного раза. Между тем, при круговом движении немедленно возникает затруднение, которое на первый взгляд представляется неразрешимым. Кстати, теоретически эти две ситуации не так уж далеки одна от другой, поскольку радиус орбиты можно (во всяком случае – мысленно) увеличить до колоссальных размеров, близких к периметру (замкнутой) Вселенной.

Решение парадокса я вижу только в идее Ньютона о существовании абсолютной системы отсчета. В отношении вращательного движения эта идея имеет многочисленные и хорошо известные экспериментальные доказательства, например – прецессия осей вращения гироскопов. Наш пример с круговой орбитой, которая охватывает всю замкнутую Вселенную²⁶, показывает, что прямолинейное движение в определенном смысле вообще может рассматриваться только в качестве приближения.

Авторы другой статьи [**Gron and Braeck, 2009**] из Архива, откликнувшиеся на работу Абрамовича и Байтлика, пишут (перевод мой – МХШ):

... в глобальном пустом пространстве-времени Минковского нет ответа на следующий вопрос: что определяет состояние вращения инерциальных систем отсчета? Мы поэтому предполагаем, что глобально пустое пространство-время Минковского, равно как и асимптотическое пространство-время Минковского вдали от локально распределенных масс, являются неудовлетворительными моделями пространства-времени.

В связи этим авторы указанной работы предлагают дополнить модель пространства-времени Минковского:

Представленный анализ предполагает, что пространство-время Минковского не должно мыслиться глобально пустым. Мы предлагаем обобщенную модель пространства Минковского, т.е. глобально плоского пространства-времени или плоской области асимптотически плоского пространства-времени, где пространство дополнено удаленной космической оболочкой с радиусом, равным его (пространства) радиусу Шварцшильда, представляющей космическую массу.

В такой модели вращение любого объекта относительно космической оболочки имеет абсолютный характер, а угловая скорость этого вращения вносит совершенно определенный вклад²⁷ в “кинематическое” замедление времени. Если центральная точка орбиты в ранее рассмотренном примере вращения вокруг нее двух близнецов сама по себе имеет нулевую угловую относительно неподвижного небосвода (космической оболочки), то жестко связанная с ней система отсчета действительно дает истинное описание течения времени для каждого из близнецов.

С абсолютной системой отсчета связаны и хорошо известные идеи Э. Маха. Вот что говорится об этом в работе [**Анисович, 1996**]:

Эрнст Мах в своей "Механике" обратил внимание на, то обстоятельство, что когда мы имеем дело с инерциальной системой отсчета, она всегда оказывается покоящейся, либо равномерно движущейся без вращения относительно окружающего нас "фона" далеких звезд (и галактик). И наоборот, неинерциальной системой отсчета всякий раз оказывается система, которая неравномерно движется, либо вращается по отношению к этому звездному "фону". В частности, при вращении системы отсчета относительно этого звездного фона в ней будут наблюдаться силы Кориолиса, и другие силы инерции.

Учитывая это, Э. Мах высказал утверждение, что такое совпадение не случайно, и что причиной инерциальности или неинерциальности системы является не характер ее

²⁶ В разделе 3.13 и в работе [**Шульман и Раффел, 2008**] показано, что за 13.7 млрд лет реликтовые фотоны действительно успевают облететь всю расширяющуюся Вселенную, и это дает реально наблюдающийся пик в начальной области спектра мощности микроволнового космического фонового излучения.

²⁷ Авторы [**Gron and Braeck, 2009**] называют это “эффе́ктом космического времени”.

движения относительно "абсолютного пространства", а характер движения ее относительно окружающего "фона" звезд.

При этом вклад в образование "инерциальности" системы от движения окружающих тел должен быть интегральным и при этом таким, чтобы влияние произвольного движения ближайших, даже в нашем представлении и массивных тел на инерциальность системы было бы незначительным, в то время как интегральный вклад от большого числа окружающих далеких масс был бы определяющим.

Авторы работы [Gron and Braeck, 2009] не дают никаких пояснений относительно физического смысла вышеупомянутой космической оболочки Вселенной. Поддерживая их формулировку, я предлагаю ее физическую интерпретацию на основе ТШРВ. В этой модели предполагается, что наша Вселенная представляет собой гипермассивную черную дыру в некоторой "материнской" вселенной и отделена от нее соответствующим горизонтом событий. Радиус этой дыры как раз равен ее радиусу Шварцшильда. Внутри дыры естественным образом возникает время, равное ее текущему размеру, деленному на скорость света. Расширение нашей Вселенной получает естественное объяснение как следствие роста такой черной дыры и ее горизонта событий за счет поглощения материи и энергии извне.

В такой модели с необходимостью должны соблюдаться законы сохранения внутреннего импульса и внутреннего углового момента. Эти законы сохранения обычно связывают с однородностью и изотропностью пространства. Вместе с тем механизм действия подобных законов *обязательно должен быть связан с некоторым физическим взаимодействием* между различными телами. Именно благодаря ему одни тела реагируют на воздействие, которое оказывается на другие тела. Таким образом, инерция представляет собой не что иное, как реакцию среды, окружающей данное тело, на приложенное к нему воздействие.

Если радиус взаимодействия, обуславливающего данный тип инерции, невелик, то данная сила инерции проявляется локально. Например, электрические заряды противоположных знаков эффективно экранируют друг друга, поэтому в электрической цепи, где параметром инерции служит индуктивность, инерционность этого типа в основном локализована в небольшой области пространства. Напротив, гравитация действует на огромных расстояниях, а обусловленная ею кривизна пространства проявляется в каждой точке Вселенной. Поэтому обычная механическая мера инерции тела обусловлена именно его гравитационной массой, т.е. энергией гравитационного взаимодействия. Если бы в пространстве не существовало других тел, кроме данного, то по определению говорить об инерции как о реакции среды было бы бессмысленно.

Напротив, вследствие существования огромного количества других тел, суммарная масса и момент инерции которых неизмеримо больше массы и момента инерции каждого отдельного тела, можно говорить об усредненной реакции глобальной среды, т.е. об абсолютной системе отсчета, линейной скорости (импульсе) и угловой скорости (угловом моменте) для конкретного тела относительно глобального фона космической материи.

Выше, при анализе кругового движения объекта, мы обращали внимание на соотношение между его кинетической и потенциальной энергией. Преобладание кинетической энергии ведет к замедлению времени. Это утверждение строго должно выполняться в абсолютной системе отсчета.

6. ТЯГОТЕНИЕ И НЕИНЕРЦИАЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

6.1. Почему тяготение приводит к неравномерности движения?

Тяготение искажает строго сферическую форму изохрон. Как, например, должны мы мыслить себе гравитационные поля частиц (звезд, планет и пр.), заполняющих Вселенную, в рамках предложенной концепции? Представим себе сначала все частицы неподвижными, дрейфующими в процессе расширения Вселенной строго вдоль радиальных мировых линий. Если в такой Вселенной существует феномен взаимного притяжения между двумя частицами, то для наблюдателя это будет выглядеть как искривление мировых линий, которые вместо радиального расхождения окажутся загнутыми в направлении одна к другой. По существу, вместо мировых линий мы можем говорить просто о силовых линиях поля тяготения, но тогда эта аналогия позволит нам отождествить изохронное сечение Вселенной с поверхностью равного потенциала, к которой эти силовые линии должны быть *нормальны*. Таким образом, мы приходим к представлению о том, что изохронное сечение Вселенной не является строго концентрической гиперсферой²⁸, а возмущено своего рода воронками (см. рис. 6.1), центрам которых отвечают гравитирующие частицы.

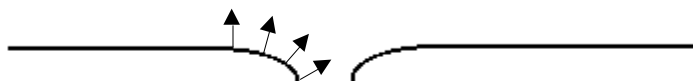


Рис. 6.1. Локальное поле тяготения

Угол отклонения профиля воронки от невозмущенной гиперсферы в точности равен углу отклонения нормали от идеально радиального направления. Следовательно, мера интенсивности локального гравитационного поля в каждой его точке фактически совпадает с использованной нами мерой скорости частицы, что и оправдывает перенос понятия энергии, связанной с механическим движением, на область гравитационных явлений.

Что касается формы воронки, то необходимо отметить, что на ее периферии возмущение исходного профиля мало, так что угол отклонения нормали от строго радиального направления незначителен. По мере приближения к центру этот угол возрастает в соответствии с выражением для гравитационного потенциала. Это означает, что находящаяся на периферии гравитационной воронки пробная частица приобретает некоторую скорость движения, направленную к центру воронки. Но чем ближе она к центру воронки, тем больше угол отклонения мировой линии от невозмущенной нормали и, следовательно, тем большую скорость движения она должна приобрести. Это и дает ответ на вопрос, почему движение в гравитационном поле оказывается эквивалентным ускоренному движению.

Какова же причина искажения пространственного профиля Вселенной локальными полями тяготения? Я думаю, ответ на этот вопрос заключается в тесной связи происхождения массы покоя частицы с волной де Бройля. Подобно тому, как *глобальная* сферичность мира проявляет себя величиной средней плотности материи во Вселенной, волновой параметр конкретной частицы определяет *локальное* искривление пространства и тем самым порождает эффект ее индивидуального гравитационного поля.

Попробуем уяснить себе геометрический смысл гравитационного радиуса. Как я уже писал, при переходе от периферии гравитационной воронки к ее центру угол отклонения нормали от радиального (по отношению к сферической Вселенной в целом) все более

²⁸ Это не противоречит предположению о том, что наша Вселенная является черной дырой. Идеальная симметрия пространственного сечения (т.е. гиперсферы) обязательна только для *стационарных уединенных* черных дыр (т.н. “теорема об отсутствии волос”), тогда как наша Вселенная неизменно расширяется. Поэтому “внешний 3-рельеф” Вселенной должен напоминать лунный ландшафт, усеянный “гравитационными кратерами”.

возрастает. Представляется, что гравитационный радиус, отвечающий *внутренней* границе области локализации гравитационной энергии частицы, соответствует предельно возможному углу отклонения в 90 градусов, что в нашей модели действительно отвечает скорости света! Таким образом, напряженность гравитационного поля достигает бесконечности не в центре тяжести тела, а на конечном, хотя обычно и очень малом, расстоянии от него, так что точки, отстоящие от центра источника на расстоянии гравитационного радиуса, являются *точками перегиба* для внешнего профиля Вселенной.

6.2. Нужно ли использовать фиктивные гравитационные поля?

Как показано в главе 2, в ОТО обоснование расчета вариации времени на этапе торможения Космонавта основано на идее включения и отключения фиктивного внешнего гравитационного поля. Эйнштейн, автор этой фундаментальной идеи, считал ее одной из самых счастливых в своей жизни. Однако в этой же главе мы могли видеть, следуя замечательной идее [Лаури, 1963]²⁹, что феномен изменения скорости движения ракеты с Космонавтом может быть интерпретирован и в терминах СТО – он *сводится к переходу от одной сопутствующей инерциальной системы отсчета к другой*, так что с этой ракетой уже *нельзя* связать *единственную* инерциальную систему отсчета. При торможении меняется угол наклона *линии одновременности* движущейся ракеты с Космонавтом и, соответственно, *положение точки пересечения* этой линии одновременности с осью времени неподвижного (инерциального) наблюдателя – Землянина. Может возникнуть (и действительно возникает) вопрос – а нужно ли на самом деле использовать фиктивные гравитационные поля?

Позволю себе воспроизвести нередко цитируемую выдержку из монографии [Ландау и Лифшиц, 1967]:

Поля, которым эквивалентны неинерциальные системы отсчета, все же не вполне тождественны с “истинными” гравитационными полями, существующими и в неинерциальных системах. Между ними имеется существенное отличие в отношении их свойств на бесконечности. На бесконечном расстоянии от создающих поле тел “истинное” гравитационное поле всегда стремится к нулю. Поля же, которым эквивалентны неинерциальные системы отсчета, на бесконечности, напротив, неограниченно возрастают или, в крайнем случае, остаются конечными по величине. Так, например, возникающие во вращающейся системе отсчета центробежные силы неограниченно растут при удалении от оси вращения; поле, которому эквивалентна ускоренно прямолинейно движущаяся система отсчета, одинаково во всем пространстве, в том числе и на бесконечности.

Поля, которым эквивалентны неинерциальные системы отсчета, исчезают, как только мы перейдем к инерциальной системе. В противоположность этому, “истинные” гравитационные поля (существующие и в инерциальной системе отсчета) невозможно исключить никаким выбором системы отсчета. Это видно уже из указанного выше различия между условиями на бесконечности в “истинных” гравитационных полях и в полях, которым эквивалентны неинерциальные системы; поскольку последние на бесконечности к нулю не стремятся, то ясно, что никаким выбором системы отсчета нельзя исключить “истинные” поля, обращающиеся на бесконечности в нуль.

Приведенная цитата, с моей точки зрения, еще раз наводит на мысль об *уязвимости* логической позиции Эйнштейна, который считал возможным и необходимым свести описание неравномерного движения к описанию равномерного движения в гравитационном поле, опираясь на знаменитые принципы относительности и эквивалентности.

Эйнштейн, безусловно, трактовал принцип эквивалентности таким образом, что этот последний справедлив, так сказать, “в обе стороны”: как поле тяготения порождает неинерциальное движение (прямое утверждение), так и неинерциальное движение полностью

²⁹ Автор выражает благодарность Н.О.Ерохиной из Российской Государственной библиотеки за помощь в получении копии этой статьи.

(локально) сводимо к некоему эквивалентному полю тяготения (обратное утверждение). Если “прямой” тезис не вызывает возражений со времен Ньютона, то сомнения в неограниченной справедливости “обратного” тезиса не раз высказывались в физике.

Так, в работе [А.А. Логунов, 1988] указывается, что сам факт кривизны мировой линии может сделать более удобным использование криволинейных координат, но вовсе не порождает объективной необходимости в кривизне пространства-времени как таковой:

... инвариантность формы интервала в пространстве Минковского имеет место не только для класса инерциальных систем отсчета, но и для произвольно выбранного класса ускоренных систем отсчета. ... Это означает, что, имея дело с ускоренными системами отсчета, мы не выходим за рамки специальной теории относительности.

В качестве аргумента, свидетельствующего о несправедливости в общем случае “обратного” тезиса об эквивалентности, А.А. Логунов приводит следующее соображение: если пробное тело, движущееся по геодезической линии в гравитационном поле, является заряженным, то оно должно излучать электромагнитные волны, поскольку оно движется с ускорением. Однако это излучение сможет зарегистрировать и жестко связанный с этим телом наблюдатель, который, казалось бы, вопреки принципу эквивалентности, обнаружит факт собственного ускорения. В действительности речь идет об эффекте Унру, согласно которому ускорение в одной системе отсчета действительно воспринимается как повышение температуры в другой системе отсчета, и наоборот.

Хорошей иллюстрацией к тезису об использовании системы криволинейных координат без промежуточного привлечения фиктивного гравитационного поля для описания парадокса близнецов содержится в работе [Долби и Гулл, 2001]. В гл. 2 приводились диаграммы из нее, на которых были представлены линии одновременности с использованием так называемого “радарного” времени. Авторы отмечают, что линии (гиперповерхности) одновременности Космонавта зависят только от кинематических параметров и полностью могут быть поняты без обращения к общей теории относительности.

С этой целью вводится специально подобранная метрика, так что в возникающей системе координат Космонавт движется по прямой траектории и при этом обладает ускорением. Хотя теперь уже траектория Землянина оказывается искривленной, он все еще движется по инерции, т.к. в этой метрике его траектория является геодезической линией. Собственные времена Землянина и Космонавта не изменяются при переходе к такой системе координат, так что все еще именно Землянин больше стареет во время их разлуки, чем Космонавт. Метрика в этих координатах является метрикой пространства Минковского, однако с изломом при пересечении линий $x = \pm t$, который вынуждает геодезические линии “поворачивать” при пересечении этих линий.



а) “равномерно-ускоренный” поворот

б) “мгновенный” поворот

Рис. 6.2. Линии одновременности (“радарное” время) Землянина, изображенные в системе координат Космонавта

В этой системе координат гиперповерхности одновременности Землянина очень похожи на гиперповерхности одновременности Космонавта в исходной системе координат. Однако Землянин сохраняет инерциальное движение. Изображение этих результатов в различных координатных системах приводит к такому же заключению. Кроме того, поскольку определение радарного времени не зависит от выбора системы координат, то любое утверждение Космонавта вида “Землянин сделал то-то в такой-то момент времени” (с точки зрения Космонавта), или любое утверждение Землянина вида “Космонавт сделал то-то в такой-то момент времени” (с точки зрения Землянина), останется справедливым при переходе к другой системе координат.

6.3. Ускоренное движение и специальная теория относительности

Возвратимся к рассмотрению течения времени с точки зрения Космонавта и Землянина, *оставаясь в этом подразделе строго в рамках концепций СТО*. Будем исходить из того, что Землянин четко контролирует факт собственной непрерывной инерциальности (отсутствия ускорений), а Космонавт столь же надежно не только регистрирует ускорение и торможения своей ракеты, но и количественно способен определить его значение. Как же при этом выглядит процесс течения времени для каждого из наблюдателей?

Землянин знает, что часы Космонавта покажут время $t_{\text{косм}}$, связанное с показанием часов Землянина $t_{\text{земл}}$ соотношением:

$$t_{\text{косм}} = t_{\text{земл}} (1 - v^2/c^2)^{1/2}$$

При этом Землянину не надо учитывать ни *знак* скорости Космонавта, ни *изменение* этой скорости (т.е. ускорение и торможение ракеты Космонавта) – ему *достаточно* просуммировать отрезки (быть может, достаточно малые) прямолинейного равномерного движения ракеты и учесть лоренцево сокращение времени Космонавта на каждом из них. Для рассмотренного случая двух этапов движения ракеты (удаление и возвращение со скоростью v) графическая диаграмма течения времени с точки зрения Землянина будет выглядеть так, как показано на рис. 6.3(а). На всем протяжении пути промежутки времени по часам Землянина *больше*, чем промежутки времени по часам Космонавта, поэтому угол наклона жирной линии будет больше 45° .

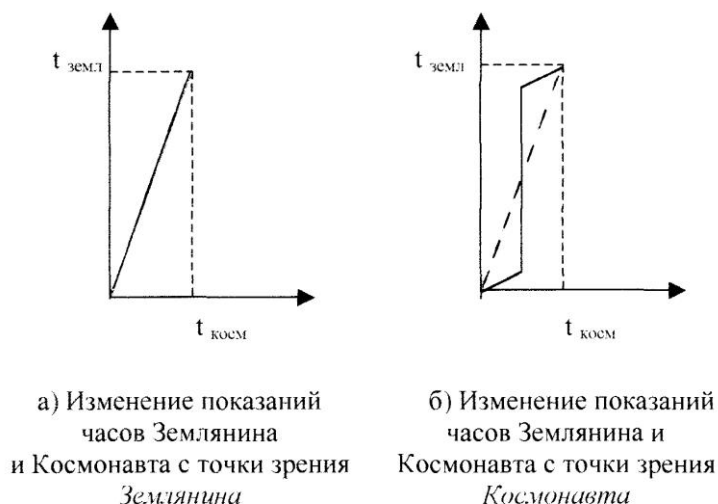


Рис. 6.3. Изменение показаний часов Землянина и Космонавта с различных точек зрения

Что касается Космонавта, то для него на тех участках его движения, где ракета летит без ускорения или торможения, соотношение между промежутками времени по его часам и по часам Землянина должно быть *противоположным*. Соответствующие промежутки времени по

часам Землянина теперь уже *меньше*, чем промежутки времени по часам Космонавта (а угол наклона жирной линии на этих участках – меньше 45°). Следовательно (как это вытекает и из ОТО), на *этапе торможения* должен возникнуть *скачок* времени, в точности *восстанавливающий результирующее соотношение* между полным временем движения по различным часам. Поэтому с точки зрения Космонавта графическая диаграмма будет выглядеть так, как показано на рис. 6.3(б).

Примечание: если скорость Космонавта будет равна скорости света, то на рис. 6.3(б) наклонные участки трансформируются в горизонтальные, а “скачок времени” в середине изображенного участка просто окажется равным величине $t_{\text{земл}}$.

Таким образом, в системе отсчета Космонавта часы Землянина в рассматриваемом случае претерпевают положительный скачок времени, который следует прибавить к “правильным”, по мнению Космонавта, показаниям его (Космонавта) часов.

Итак, подсчет времени на часах Землянина, производимый Космонавтом, движущимся (в общем случае) неравномерно, состоит из двух алгоритмических процедур:

- Учет лоренцева сокращения времени Землянина, поскольку тот движется относительно Космонавта.
- Учет *положительных* скачков времени Землянина при *ускорении* Космонавта в направлении к Земле и *отрицательных* скачков времени Землянина при *ускорении* Космонавта в направлении от Земли.

Как мы видели в главе 2, каждый такой скачок отвечает мгновенному изменению положения линии одновременности и, вообще говоря, может быть любого знака. Последнее обстоятельство, однако, не может привести к тому, чтобы время на часах Космонавта превысило показание часов Землянина! С одной стороны, к этому выводу приводит результат подсчета времени в инерциальной системе отсчета Землянина. С другой стороны, дело здесь в том, что в псевдоевклидовом пространстве (в противоположность евклидовому) сумма интервалов (псевдодлина) для ломаной линии всегда *меньше*, чем для прямой. Таким образом, возможные отрицательные скачки времени Землянина (в системе отсчета Космонавта) к моменту их встречи неизбежно окажутся скомпенсированы и превышены положительными скачками.

Это наводит на мысль, что возможен иной подход к подсчету времени Землянина в системе отсчета Космонавта, отличный от вышеописанной двучленной алгоритмической процедуры, который бы на каждом отрезке равномерного движения Космонавта объяснял бы его однозначную “экономия” времени по сравнению с Землянином и не использовал бы *кажущееся* лоренцево сокращение времени в одной системе отсчета относительно другой. Такой подход, демонстрирующий “парадокс часов”, действительно существует и проиллюстрирован на рис. 6.4.

На этом рисунке, как и на рис. 2.5, мировая линия Землянина изображается отрезком **OABC** оси времени t (особо подчеркну, что точки **A** и **B** на оси t – те же самые, т.е. в точности совпадают с точками пересечения оси t с линиями одновременности ракеты Космонавта в точке **T** поворота).

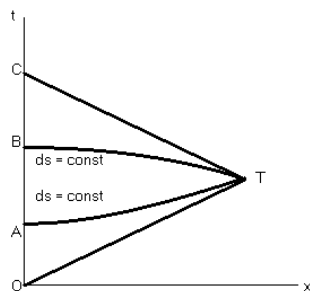


Рис. 6.4. Собственное время Землянина меньше, чем собственное время Космонавта

Космонавт же движется на ракете по отрезкам мировой линии **ОТ** и **ТС**. Так как кривая **АТ** отвечает множеству точек-событий с *одинаковым интервалом относительно точки О*, то на этапе удаления ракеты от Земли и часы Землянина (на отрезке мировой линии **ОА**), и часы Космонавта (при движении по мировой линии **ОТ**) покажут одинаковое время ds/c в соответствующих системах отсчета. Аналогичным образом, на этапе приближения ракеты к Земле и часы Землянина (на отрезке мировой линии **ВС**), и часы Космонавта (при движении по мировой линии **ТС**) покажут одинаковое время ds/c в соответствующих системах отсчета, поскольку кривая **ВТ** отвечает множеству точек-событий с *одинаковым интервалом, отделяющим их от точки С*. Поэтому собственное время Космонавта составит $2ds/c$, тогда как собственное время Землянина окажется *больше* этой величины на длину отрезка **АВ**.

Замечание: обратим внимание на полную симметрию этапов удаления и возвращения Космонавта. Из этого следует, что, в случае наличия не двух, а большего числа этапов ускорения и торможения, построения для каждого из них, включая последний, могут быть совершенно идентичны построениям на первом этапе.

Обобщая наш мысленный опыт, мы можем отказаться от условия *симметрии* этапов удаления и возвращения Космонавта. Мы можем также допустить не одну, а произвольное число точек торможения и ускорения (с ломаной или даже волнистой мировой линией), лишь бы последнее 4-мерное событие состояло в возвращении Космонавта на Землю, движение которой (в составе Солнечной системы) мы полагаем *инерциальным*, т.е. равномерным и прямолинейным. В этом случае Землянин может смело доверять своим часам, а Космонавт должен разбить свою мировую линию на приблизительно прямолинейные отрезки и суммировать их длины, деленные на скорость света.

Наконец, мы можем рассмотреть неравномерное движение двух (или более) космонавтов, вылетевших из одной общей пространственной точки и позднее встретившихся в той же или даже в другой пространственной точке. В этом случае *каждый* космонавт должен разбить свою мировую линию на приблизительно прямолинейные отрезки и суммировать их длины, деленные на скорость света. Вместо реальной Земли мы можем при этом мысленно рассмотреть воображаемые часы, инерциальным образом движущиеся из места (и в момент) их разлета в точку (и момент) их встречи - такая система отсчета физически всегда реализуема, и именно эти часы покажут время, заведомо большее, чем время путешествия на часах любого из космонавтов.

6.4. Связь хода времени с величиной энергии

Из рис. 6.4 нетрудно видеть, что “скачок времени” происходит при изменении скорости, т.е. именно в точке Т. Если инерциальный (например, покоящийся) наблюдатель равномерно пересекает с течением времени одну линию $ds = \text{const}$ за другой, то *изменяющий* свою скорость путешественник осуществляет как бы “прыжок” с одной такой линии на другую, отделенную от текущей конечным интервалом времени. В пределе (когда скорость меняется от c до минус c) “выигрыш во времени” может стать максимальным и равным всему времени “дрейфа” покоящегося наблюдателя. Но такое изменение скорости всегда связано с соответствующим изменением кинетической энергии, поэтому возникает естественное соображение – вместо использования фиктивного гравитационного поля увязать пертурбации во времени с реальным изменением именно кинетической энергии!

Согласно СТО, интервалы времени Δt в движущейся системе *меньше*, чем в покоящейся, причем лоренцев фактор сокращения равен $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$. С другой стороны, энергия E движущегося тела точно в такое же число раз *больше* энергии этого же тела в состоянии покоя. Таким образом, произведение факторов энергии тела и интервала времени в теории относительности оказывается инвариантом.

“Энергетические” аргументы, связанные с разностью потенциалов гравитационного поля и изменяющие, например, энергию пролетающего через него фотона, фигурировали, как мы

помним, при установлении эквивалентности ускоренных систем и систем, находящихся в поле тяготения. Когда речь идет о реальном поле тяготения, такая аргументация выглядит вполне убедительной и связана с характеристиками этого реального поля. Однако в случае произвольных неравномерно движущихся объектов реально наблюдаемым феноменом является лишь изменение энергии самих этих объектов. В самом деле, как мы видели в главе 2, *относительный* суммарный “скачок” времени, вызванный изменением скорости Космонавта, составил $(\Delta T_{\text{сумм}} / \tau') = v^2/c^2$ (где τ' – длительность этапа торможения). Поэтому изменение энергии, определяющее *относительный* эффект, не зависит ни от ускорения, ни от расстояния между Космонавтом и Землянином, а зависит лишь от величины v^2 . Заменяя потенциал *фиктивного* (искусственно вводимого) гравитационного поля *реальным* изменением (удельной, т.е. на единицу массы) кинетической энергии и именно с ним связывая изменение хода времени, мы изгоняем, как мне кажется, из физики ненужные призраки.

Что же собой представляет ход времени? Неожиданный, но интуитивно содержательный ответ на этот вопрос мы находим в квантовой механике. Всякий квантовый объект несет в себе свои собственные “встроенные” часы, характеризующиеся частотой колебаний де Бройля, которая прямо пропорциональна энергии этого объекта. При этом коэффициент пропорциональности представляет собой единицу, деленную на постоянную Планка.

Макроскопическое тело представляет собой определенную совокупность квантовых объектов, каждый из которых характеризуется своей де-Бройлевой частотой или набором соответствующих частот. Различие частот не играет роли, т.к. при постоянной скорости движения и энергии тела соотношение между ними всегда одинаково. В самом деле, в жизни мы пользуемся часами с различным механизмом и продолжительностью колебаний (песочными, механическими, атомными), но всегда приводим их показания к тому или иному выбранному нами эталону. Если теперь мы изменим скорость тела, то тем самым изменим его энергию и частоты всех колебаний, причем *в одно и то же число раз!*

Я думаю, этот пример наилучшим образом и объясняет нам, *что такое ход времени*. Сам процесс изменения скорости есть переходной процесс от колебаний с одной частотой (энергией) к колебаниям с другой частотой (энергией) и, естественно, связан с результирующей вариацией суммарного времени движения. Замечу, что аналогичные рассуждения можно провести и для размеров тел в связи с длиной волны де Бройля.

6.5. Ускоренное движение и ТШРВ

С точки зрения ТШРВ ситуация с ходом времени кажется намного прозрачней. В каждой пространственной точке можно ввести абсолютно неподвижную систему отсчета, сопутствующую расширению Вселенной, т.е. дрейфующую вдоль 4-мерного радиуса Вселенной перпендикулярно к текущей изохронной 3-мерной гиперповерхности. В этой сопутствующей системе отсчета время течет быстрее, чем в любой движущейся относительно нее системе отсчета, как инерциальной, так и неинерциальной. Поместим в эту сопутствующую абсолютно неподвижную систему отсчета Землянина. Тогда часы любого Космонавта, улетевшего от Землянина, а затем вернувшись к нему, покажут меньшее время (т.е. будут идти медленнее), чем часы Землянина.

Заметим, что *понятие изохроны имеет смысл только для абсолютно неподвижной системы*. Для движущейся системы отсчета относительный промежуток времени между изохронами сокращается пропорционально квадрату скорости движения, поэтому (и только поэтому!) и возникают парадоксы часов и близнецов, иллюзия “скачка времени” при торможении и ускорении.

Собственно, путь “туда” и “обратно” можно свести к простому повторению первого этапа, поэтому достаточно проанализировать только путь “туда”. Еще раз рассмотрим “круговую диаграмму” (рис. 6.5) с радиусом, отвечающего одному и тому же времени движения t в системе отсчета Землянина, для Космонавтов, движущихся с различными скоростями v .

Проекция на горизонтальную ось будет пропорциональна пройденному расстоянию (vt), проекция на вертикальную ось – собственному времени по часам Космонавта ($t\sqrt{1-(v^2/c^2)}$).

Абсолютно неподвижный наблюдатель (Землянин) благополучно осуществит дрейф между двумя (горизонтальными) изохронами. Космонавт, движущейся с промежуточной скоростью, достигнет за это время только *промежуточной* изохроны и окажется на соответствующем расстоянии от исходной точки. Например, если скорость движения составит $c/(\sqrt{2})$, а угол с вертикалью – 45 градусов, то пройденное расстояние составит $ct/(\sqrt{2})$.

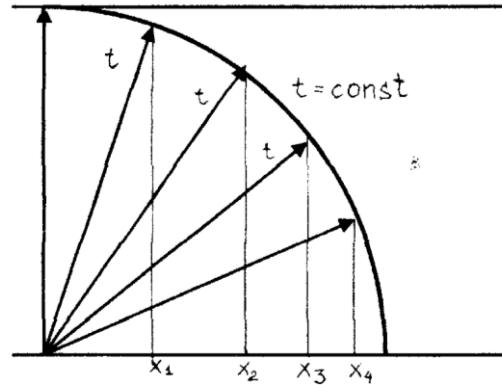


Рис. 6.5. Определение времен и расстояний в ТШРВ

Если Землянин сравнит зарегистрированное им время t движения Космонавта с показаниями часов последнего, то он в общем случае зафиксирует *относительное различие* показаний часов, равное v^2/c^2 . Когда же Космонавт движется со скоростью света, то за *нулевое* собственное время (нулевая проекция на вертикальную ось) он окажется на расстоянии, равном ct . По часам же Землянина он потратит на это время t , т.е. *относительное различие* показаний часов составит 1.

7. ВРЕМЯ, ПРОСТРАНСТВО И ИЗЛУЧЕНИЕ

7.1. Близкодействие и дальноедействие

В общепринятой трактовке теории электромагнитного поля (см. [Ландау и Лифшиц, 1967]) действие для частицы с зарядом e и массой m описывается (без учета внешнего поля и в отсутствие других зарядов) выражением

$$S = -m \int ds - (e/c) \int A_k dx^k$$

где c – скорость света, A_k – компоненты вектор-потенциала поля, а интегралы берутся по 4-мерной мировой линии от точки, отвечающей *началу* движения, до *конечной* точки. Реальной мировой линии отвечает экстремум этого интеграла.

Традиционная концепция описания электромагнитного излучения одиночного заряда лишь запаздывающими потенциалами создает, как может показаться, определенную коллизию с *обратимостью исходных уравнений электродинамики*, которая приводит к формальной допустимости использования симметричного во времени решения – линейной комбинации выражений $f(t - x/c)$ и $f(t + x/c)$. При этом нельзя не отметить, что и *обратимые* уравнения механики чаще всего используются лишь для описания *будущего* поведения объектов. В то же время именно *обратимость* уравнений механики является, как убедительно показано в [Хайтун, 1996], непреодолимым препятствием для *априорного* обоснования необратимости стохастического поведения физических ансамблей.

Между тем, идея *симметричного* во времени процесса электромагнитного взаимодействия в начале 20-го века начала завоевывать умы физиков. Так, авторы работы [Уилер и Фейнман, 1945] приводят яркое и глубокое высказывание Тетроте (1922 год), который считал излучение следствием непосредственного взаимодействия между излучателем и поглотителем (перевод мой – М.Х.Ш.):

...источник света не излучал бы, если бы где-либо не нашлось тела, способного поглотить это излучение... например, если я вчера наблюдал с помощью телескопа звезду, удаленную, скажем, на 100 световых лет, то не только я знаю, что испущенный ею 100 лет назад свет достиг моего глаза, но также и звезда или ее отдельные атомы уже 100 лет назад знали, что я, который даже еще не существовал тогда, вчера вечером увижу этот свет...

В результате Фоккером и другими физиками была сделана попытка представить действие в более симметричной по отношению ко времени форме (см. [Владимиров и Турыгин, 1985]), где интегралы в выражении для действия (в пространстве Минковского) берутся уже не от *начальной* точки движения до *конечной*, а *от некоторой 4-мерной точки в прошлом до симметричной ей точки в будущем*, причем вектор-потенциал A представляет собой просто сумму таких симметризованных во времени парных взаимодействий выбранной (излучающей) частицы с каждой из остальных частиц Вселенной. В результате действие поля заменяется совокупностью *прямых* и *нелокальных* в пространстве-времени межчастичных взаимодействий.

Такой формализм эквивалентен уравнениям Максвелла, однако “опережающее” взаимодействие, которое в нем присутствует наравне с “запаздывающим”, входит в противоречие с физической интуицией и отвечающим ей принципом причинности. Более того, как будет видно из дальнейшего изложения, в целом проблема необратимости таким образом вовсе не устраняется, а лишь проявляет себя в другом месте. С другой стороны, имеются глубокие физические основания использовать именно симметричный во времени формализм для описания *микроскопических* взаимодействий.

Дальнейшее развитие эти идеи получили в середине 20-го века, когда были опубликованы знаменитые работы [Уилер и Фейнман, 1945, 1949], придавшие идее нелокального дальнего действия зарядов вполне конкурентоспособный статус по сравнению с идеей ближнего действия. Напомню, что согласно последней поле распространяется локально – от одной точки к другой, соседней с ней. Акт и источник излучения в теории ближнего действия никак не связываются с актом поглощения и его будущим приемником (поглотителем). Напротив, в теории дальнего действия источник и приемник излучения связываются воедино этим процессом. При этом в основе всех моделей симметризованного во времени процесса излучения лежит представление о существовании во Вселенной распределенной среды, состоящей из *большого числа вторичных зарядов*, которые и определяют важнейшие особенности этого феномена.

Надо сказать, что роль такого рода среды велика и в классической электродинамике. В частности, эта роль заключается в эффекте замедления скорости распространения по сравнению со скоростью света в вакууме. Данный эффект связан с наличием в той или иной среде связанных зарядов, которые создают вторичные поля, т.е. переизлучают электромагнитные колебания с определенной фазовой задержкой. Действительно, в отсутствие *промежуточных* зарядов *исходный* осциллирующий заряд создавал бы для *пробного* заряда поле, пропорциональное множителю $\cos(\omega t - r/c)$, где r – расстояние между исходным и пробным зарядами. Однако исходный заряд действует также и на промежуточные заряды, которые вследствие этого (с фазовой задержкой) создают *дополнительное* воздействие на пробный заряд. В результате действия большого числа таких связанных зарядов возникает (см. [Фейнман и др., 1963]) так называемый показатель преломления среды. При прохождении света через среду показатель преломления может быть комплексным. Появление мнимой части означает, что кроме сдвига фазы происходит еще и поглощение энергии колебаний излучения.

Фейнман рассматривает механизм *обратного* воздействия вторичных зарядов на первичный, вводя два основных предположения. Первое из них состоит как раз в *симметричном* использовании *опережающего* потенциала реакции наряду с *запаздывающим*. Оно, однако, позволяет вывести значение для силы радиационного трения, пропорционального самому исходному ускорению (а не его производной по времени, как должно быть в окончательном результате) излучающего первичного заряда и объемной концентрации вторичных зарядов, окружающих источник излучения.

Ситуацию исправляет второе предположение, которое заключается в обязательном наличии достаточно большого количества вышеупомянутых вторичных зарядов, распределенных во Вселенной (и связанного с ними показателя преломления). Благодаря этому при интегрировании по всему множеству вторичных зарядов учитывается дополнительный фазовый множитель, также зависящий от объемной концентрации частиц. В результате после интегрирования зависимость от объемной концентрации исчезает (интеграл берется от нуля до бесконечности, в случае конечного радиуса “облака зарядов” зависимость оставалась бы), и для каждой отдельной частотной компоненты силы появляется множитель, равный ее частоте, что соответствует переходу от самой функции к ее производной по времени.

7.2. Обсуждение модели излучения Уилера-Фейнмана

В данном параграфе я позволю себе обнародовать критическую оценку модели излучения Уилера и Фейнмана. Прежде всего, авторы этой концепции утверждают, что из исходной симметричной суммы опережающих и запаздывающих потенциалов удастся вывести в итоге правильное результирующее соотношение, в котором (в согласии с опытом) остаются лишь запаздывающие слагаемые. Должен к стыду своему честно признаться, что формальное доказательство этого факта (как в оригинальной статье, так и в изложении других авторов) не показалось мне ни ясным, ни бесспорным.

Между тем опережающие потенциалы привлекаются не столько с целью добиться формальной симметрии решения во времени как таковой, сколько для того, чтобы *объяснить* так называемое *радиационное трение обратным действием* вторичных зарядов (поглотителей)

на первичный (излучающий), а не “самодействием электрона” по Лоренцу. Именно в успехе такого объяснения и кроется привлекательность гипотезы Уилера-Фейнмана. А нельзя ли соединить такой механизм обратной связи с традиционным использованием одних только запаздывающих потенциалов?

Анализ рассуждений Уилера и Фейнмана показывает, что они оперируют с сугубо *стационарным* процессом электромагнитных колебаний, используя разложение поля в ряд Фурье по отдельным гармоникам. Этот прием, во всяком случае, характерен для первых двух из четырех альтернативных способов, с помощью которых указанные авторы приходят к окончательному результату. При таком подходе исходное электромагнитное воздействие не имеет во времени ни начала, ни конца, и каждый конкретно рассматриваемый период колебаний при соответствующем выборе фазы *не отличим* от любого другого, предшествующего ему или следующего за ним. Замечу, что аналогичный подход подразумевается и при традиционном рассмотрении, поскольку подсчет силы радиационного трения основан на оценке мощности *стационарного* излучения, т.е. на зависимости от частоты для *равновесного (установившегося)* процесса.

Таким образом, для обоснования механизма обратной связи достаточно, чтобы обратное *гармоническое* воздействие приходило к излучающему заряду в *нужной фазе*. Но такое обратное воздействие может создаваться не за счет *реально* опережающего воздействия, а за счет запаздывающего влияния поглотителя, удаленного на определенное расстояние от излучателя, причем очевидно, что это (выделенное) расстояние должно быть *кратно длине волны*.

А как быть с обратным воздействием от всех *остальных* поглотителей, которые расположены не в этих *узловых* точках? Я полагаю, что их суммарный вклад равен нулю. Действительно, рассмотрим любую пару таких точек, расположенных *симметрично* по обе стороны от узла. В силу строгой нечетности синусоиды фазы приходящей от них к излучателю реакции противоположны и поэтому взаимно компенсируют друг друга.

Если принять такую интерпретацию, то конкретный механизм возникновения радиационного трения, предложенный Фейнманом, утрачивает всякие элементы мистики и становится адекватным природе вещей.

Следует отметить, что сам факт существования реакции, т.е. обратной связи, совершенно не обязательно должен связываться с наличием *опережающего* воздействия. Скорее, напротив. Так, сила F_{mp} обычного *механического* трения возникает, как физическое следствие внешней движущей силы F , и никоим образом не является опережающей. Учет трения производится заменой закона движения Ньютона $a = F/m$ на $a = (F - F_{mp})/m$, где a – ускорение, m – масса тела. Скорректированное выражение показывает, что *реальное* ускорение оказывается меньше *потенциально возможного* из-за потери энергии вследствие реакции.

Что касается электромагнитных явлений, то процесс излучения в пространстве имеет глубокое и неслучайное внутреннее сходство с распространением сигнала в электрической цепочечной схеме или в длинной линии. Поэтому учет *радиационного* трения аналогичным образом может быть осуществлен в эквивалентной электрической схеме замещения путем перехода в законе Ома от величины тока $i = E/z$ к величине $i = (E - U_{pad})/z$. Здесь E – внешняя электродвижущая сила (в реальности обусловленная механическими колебаниями первичного излучающего заряда), z – импеданс вакуума (477 Ом). Слагаемое U_{pad} , ответственное за радиационное трение, может быть интерпретировано как падение напряжения на *внутреннем сопротивлении* источника, который, таким образом, является не *идеальным*. *Реальный* ток оказывается меньше *потенциально возможного* из-за потери энергии вследствие реакции.

Возможность существования колебаний в пространстве часто воспринимается как само собой разумеющийся факт. В действительности это требует наличия *специфической среды*, заполняющей пространство. Такая среда обладает способностью (выраженной строго количественно) запасать, возвращать и передавать с конечной скоростью далее энергию электромагнитного поля, и притом с определенными типом и степенью инерционности, что и приводит к появлению колебаний, стоячих, прямых и отраженных бегущих волн.

Трактовка радиационного трения как обычной (не опережающей в истинном смысле этого слова) реакции имеет глубокий физический смысл еще по одной причине. Эта реакция, как известно, описывается уравнением *третьего* порядка по координате колеблющегося заряда. В случае стационарного гармонического колебания это, как и для членов *первого* порядка, приводит, в полном соответствии с действительностью, к *необратимой* потере активной энергии.

Хотел бы дополнительно обратить внимание читателя на следующую непоследовательность, присущую, как мне кажется, модели Уилера-Фейнмана. Авторы этой модели, с одной стороны, говорят о *прямом* межчастичном взаимодействии, а с другой стороны (при описании этого взаимодействия) учитывают наличие *промежуточной* среды и соответствующего показателя преломления. Хотя зависимость от величины этого показателя при бесконечном радиусе поглощающей среды, как мы видели, исчезает, но он играет важную роль, если этот радиус конечен.

Добавлю, что учитывая потери энергии на радиационное трение для первичного излучателя, авторы модели совершенно не затрагивают вопрос о подобных потерях энергии для вторичных зарядов (поглотителей). Если этот фактор учитывать, получается, что среды без поглощения не бывает (что, видимо, сущая правда). Более того, фактор рассеяния энергии вследствие обратного воздействия введен Уилером и Фейнманом “руками”, вне рамок волнового уравнения, поскольку это уравнение выводится из уравнений Максвелла для области, свободной от зарядов. Учет зарядов и их взаимодействия должен привести – в принципиальном плане – к замене обычного волнового уравнения на более сложное, а его решение должно будет содержать, в том числе, полное описание обратного влияния зарядов на излучатель и эффекта радиационного трения.

7.3. Излучение и теория шаровой расширяющейся Вселенной

Значит ли вышесказанное, что прямое межчастичное взаимодействие – фикция? Как соотносятся представления о *прямом* межчастичном взаимодействии с новыми представлениям, излагаемым в настоящей работе?

С одной стороны, как неоднократно отмечалось в предшествующем изложении, ТШРВ исходит из представления об абсолютной одновременности всех тех и только тех физических событий, которые принадлежат *изохронным* гиперповерхностям 4-мерного шара, представляющим соответствующие сечения истории Вселенной. Из этого в конечном счете следует, что свет распространяется нормально направлению времени, т.е. вдоль гиперповерхностей. Когда световой квант от звезды движется к глазам земного наблюдателя, его (кванта) движение может быть связано с *единственной* инерциальной системой отсчета, сравнить показания часов в этой системе и в системе отсчета Землянина *невозможно*, так что гипотеза Тетроде о *прямом* взаимодействии излучателя (звезды) и поглотителя (глаза земного наблюдателя) оказывается удивительным образом верна!

С другой стороны, как только мы говорим об *обратном* действии поглотителя на излучатель в связи с моделью непосредственного межчастичного взаимодействия, мы вынуждены вернуться к уже известному нам решению (в предельном случае световой скорости) для парадокса часов. Вначале, когда световой квант уносится от источника, ему можно соотнести одну инерциальную систему. При отражении сигнала эта сопутствующая ему инерциальная система благополучно продолжает свой мысленный полет, а отраженный квант “перепрыгивает” в *другую* (движущуюся назад к Земле) инерциальную систему отсчета и на *другую* изохрону, *меняя* при этом *знак* скорости и вектора *импульса* на противоположный. Если считать, что этот процесс прыжка занимает все же какое-то (очень малое) время, то частота фотона как бы очень быстро снижается до нуля, а затем снова возрастает до исходной величины; тут-то и возникает скачок времени! Именно поэтому между посылкой исходного сигнала (например, на Луну или на Марс) и приемом отраженного сигнала возникает пауза, которая в точности равна двойному промежутку времени, необходимому для распространения

света на соответствующее расстояние. Таким образом, в ТШРВ, насколько я понимаю, возникает та же система представлений о доминировании “запаздывающего” потенциала, что и в традиционной электродинамике.

8. О НЕОБРАТИМОСТИ

8.1. Общий анализ проблемы

Как говорилось в самом начале книги, в науке уже давно обсуждается так называемая “стрела времени” (И.Пригожин [Пригожин, Стенгерс, 1994] говорит о “парадоксе времени”), связанная с необратимостью подавляющего большинства природных явлений и вторым началом термодинамики. Попробуем получить общее представление об этой проблеме, рассматривая вначале относительно *небольшие* масштабы времени, когда космологическими процессами, связанными с расширением Вселенной и связанным с этим нарушением закона сохранения энергии можно пренебречь. Позже мы отдельно рассмотрим случай больших временных масштабов.

В классической механике часто рассматривают уравнение (одномерного) движения свободной точечной частицы в виде

$$F(t) = m \, d^2q/dt^2$$

где $F(t)$ – внешняя сила, m – инертная масса частицы, d^2q/dt^2 – вторая производная координаты по времени. Если подразумевается, что частица (помимо силы F) никак не взаимодействует с внешней средой, то данное уравнение справедливо и характеризуется замечательной симметрией относительно изменения знака времени, т.е. инвариантно относительно обращения времени. Это позволило В.Томсону сделать известное утверждение (цитирую по книге [Хайтун, 1996]):

В абстрактной динамике мгновенное *обращение* движения каждой движущейся частицы системы вызывает движение системы в обратном направлении, каждая частица движется вдоль ее старого пути и с той же скоростью, что и раньше, когда оказывается в том же месте. Говоря математическим языком, всякое решение остается решением, когда t заменяется на $-t$. В физической динамике эта простая и абсолютная *обратимость* перестает иметь место, если учесть силы, зависящие от трения твердых тел, неидеальную текучесть жидкостей, неидеальную упругость твердых тел ...

Последняя фраза означает, что когда мы рассматриваем систему (не обязательно механическую) многих тел, или частицу, взаимодействующую со средой (например, электрический заряд, излучающий электромагнитные волны), то в приведенном выше простейшем уравнении следует заменить (в линейном приближении) “одинокую” производную второго порядка на сумму производных

$$F(t) = A_0q + A_1(dq/dt) + A_2(d^2q/dt^2) + \dots + A_n(d^ng/dt^n) + \dots$$

где правая часть описывает характерные свойства системы (взаимодействующей со средой частицы).

Очевидно, что в зависимости от порядка производной соответствующее слагаемое меняет или не меняет знак при изменении знака времени. Если присутствуют только члены с четными индексами, все уравнение в целом будет симметрично по времени, если имеются члены только с нечетными индексами, все уравнение в целом будет антисимметрично по времени. В общем случае – не симметрично и не антисимметрично, т.е. заведомо *необратимо* (содержит сумму двух групп слагаемых – четных и нечетных).

Как известно, решение уравнения четной степени содержит хотя бы один затухающий множитель. Решения уравнения произвольного порядка могут содержать колебательные и

апериодические решения. В качестве таких апериодических решений для системы, *не содержащей внутренних источников энергии*, рассматриваются только *затухающие* решения, что отвечает диссипацию энергии наружу. Заметим, что для замкнутой Вселенной в целом энергия, покидающая одну систему, неизбежно попадает в другие системы, для которых она должна учитываться как входная. Обратим также внимание на то, что полное обращение времени (хотя бы и мысленное) должно приводить к тому, что все обычные потребители энергии превратились бы в ее генераторы, и наоборот.

Рассмотрим далее случай, когда внешняя сила $F(t)$ является гармонической, а правая часть вышеприведенного уравнения имеет второй порядок, причем корни характеристического уравнения - мнимые. Тогда мы получаем хорошо знакомый гармонический осциллятор (грузик на механической пружине, электрическая цепь с резистором, конденсатором и катушкой индуктивности и т.п.) или взаимосвязанную систему сходных осцилляторов. В теоретической электротехнике для описания *установившихся* процессов в такой системе (с внешними источниками энергии) уже в течение многих десятков лет используют замечательный математический прием: вводят *комплексные* величины, связывая их *действительную* часть с активными (необратимыми) процессами, а мнимую – с обратимыми (реактивными) процессами. Ничто не мешает ввести точно такие же представления и для всех сходных систем иной физической природы³⁰, при описании которых мы получаем полную возможность по отдельности анализировать эти два типа процессов. Любопытно, что при записи в виде комплексной величины *гамильтониана* для осциллятора без потерь его *лагранжиан* оказывается величиной, комплексно сопряженной к гамильтониану, и при обращении времени они просто меняются местами.

8.2. Связь второго начала термодинамики с диссипацией энергии

С моей точки зрения, замечательно глубокий анализ *локальных физических* аспектов проблемы необратимости дал С.Д.Хайтун, в книге [Хайтун, 1996] которого приведена и исчерпывающая библиография по этой проблеме. Имея в виду замкнутую Вселенную, в которой выполняется закон сохранения энергии, он замечает:

Проблема необратимости проста по формулировке. Как физика является фундаментом естествознания, так и сама физика покоится на механике Ньютона-Гамильтона. Но уравнения механики симметричны во времени, ее мир обратим, тогда как реальные процессы необратимы.

Пригожин в книге [Пригожин, Стенгерс, 1994] замечает:

Второе начало термодинамики в том виде, как его сформулировал Клаузиус, т.е. утверждение о том, что все происходящие в природе процессы вызывают увеличение энтропии, относится к физико-химическим процессам. К этим процессам относятся химические реакции, перенос тепла или вещества, диффузия и т.д. Все эти процессы увеличивают энтропию и не могут быть описаны в терминах обратимых преобразований, как в примере с колебаниями маятника. Каждая химическая реакция устанавливает некоторое различие между прошлым и будущим: она эволюционирует к равновесному состоянию, которое должно существовать в нашем будущем. Аналогичным образом в изолированной системе все неоднородности распределения температуры сглаживаются, и в будущем распределение становится однородным. Таким образом, эволюция обретает весьма ограниченный смысл: она приводит к исчезновению порождающих ее причин.

Сам Пригожин, который являлся выдающимся современным специалистом в области физики необратимых процессов, попытался решить проблему необратимости за счет

³⁰ В книге [Шульман, 2004] я распространяю эти представления и на сферу квантовой механики.

использования более “богатого” (чем пространство Гильберта) пространства функций, описывающих квантовомеханическую эволюцию состояний. В используемой им модели к действительной части показателя экспоненциального множителя добавляется или вычитается (в зависимости от знака времени) малая мнимая часть, что автоматически позволяет внести различие между прошлым и будущим. Однако Хайтун справедливо указывает на произвольность такой модификации решения, если исходные уравнения остаются неизменными. Более того, автор [Хайтун, 1996] убедительно доказывает, что общность понимания проблемы необратимости и представления о ее решении у крупнейших физиков и математиков мира 19-го и 20-го столетий является мифом. Их взгляды зачастую значительно расходятся, а то, в чем многие из них единодушны, основывается на принципиальнейших ошибках. Важнейшая и наиболее типичная из них состоит в получении необратимых уравнений из обратимых путем неявного отбрасывания одной из двух альтернативных ветвей развития процесса или явления. Хайтун перечисляет основные направления статистической теории необратимых процессов и показывает, что четыре из них (кинетическая теория, теория флуктуаций, эргодическая теория и теория обратимого динамического хаоса) теснейшим образом связаны с механикой Гамильтона и не могут ей противоречить, а значит, не могут привести к адекватному описанию необратимых процессов. Пятое же направление – синергетика – изучающая необратимый динамический хаос, напротив, является существенно негамильтоновой и поэтому не может быть выведена в качестве следствия из динамики замкнутых систем. Еще раз повторю, что автор работы [Хайтун, 1996] подробно исследует практически все известные линии получения необратимых соотношений и каждый раз указывает то конкретное место, где допущена логическая или математическая ошибка.

Важнейшим идейным пунктом монографии [Хайтун, 1996] является обращение к формулировке второго начала термодинамики, данной Вильямом Томсоном, согласно которой в ходе необратимых процессов происходит диссипация механической энергии. При таком понимании именно *диссипация энергии является необходимым и достаточным условием необратимости* процесса. Хайтун апеллирует к классическим (Больцман, Гиббс) мысленным опытам с расплыванием газа шаров (вследствие строго упругих соударений) из угла по всему объему сосуда или расплыванием капли красителя в прозрачной несжимаемой жидкости и утверждает, что в отсутствие диссипации энергии оба эти процесса обратимы.

8.3. Возможный механизм появления необратимости при диссипации энергии

Я разделяю данное убеждение С.Д. Хайтуна и думаю, что необходим тщательный теоретический и экспериментальный анализ представлений о *неупругом взаимодействии микробъектов*, физическая сущность которого и является ключом к пониманию “обычной” необратимости. Решение парадокса тепловой необратимости я предлагаю искать в ситуации, когда уравнения гамильтоновой механики *не полностью* определяют физическую ситуацию, т.е. допускают более одного решения. В этом случае дополнительный фактор, действующий при микровзаимодействии, мог бы иметь и вероятностную природу, что сняло бы кажущееся противоречие.

Возможны ли ситуации, не описываемые однозначно гамильтоновой механикой? Да, возможны. Известно, в частности, что при упругом соударении *более чем двух* точечных частиц законы сохранения (энергии, импульса и момента импульса) дают меньшее число уравнений, чем требуется для однозначного нахождения всех скоростей. Вместе с тем подобные групповые соударения крайне маловероятны, поэтому в случае *упругого* взаимодействия существенной роли играть не могут. Однако в случае *неупругого* взаимодействия дело, как мне кажется, обстоит иначе.

Когда говорят о неупругом соударении макрообъектов, привлекаются представления об энергии деформации тел и т.п. Однако в случае микробъектов мы не можем игнорировать теплового электромагнитного излучения, всегда присутствующего в объеме, где происходит теплопередача. При неупругом соударении происходит перестройка молекул и атомов, при

этом испускаются и поглощаются тепловые фотоны. Но это означает, что фактически в *неупругом* взаимодействии всегда участвует *более двух* частиц, поскольку фотон практически является лишь *промежуточным* носителем избыточной энергии и импульса!

С точки зрения классических представлений необратимость возникает при *неупругих* соударениях уже за счет того, что кинетическая энергия разлетающихся частиц всегда строго меньше их суммарной энергии до соударения. Однако с квантовой точки зрения равновероятны как излучение, так и поглощение фотона, поэтому “демон необратимости” спрятан не здесь. В действительности необратимость связана с тем, что дополнительно “вовлекаемые” в соударение частицы выбираются фотоном-посредником абсолютно “случайно”. Именно акт излучения и поглощения фотона позволяет, как мне кажется, природе задействовать вероятностный механизм взаимодействия на микроуровне.

Во всяком случае, механизм, приводящий к установлению равновесия и формирующий “энтропийную” стрелу времени, с необходимостью должен быть определен уже на *микроуровне*. Точно так же и *биологическая* макроэволюция, выделяющая “антиэнтропийную” стрелу времени, может иметь место только в том случае, когда в ее основе заложен соответствующий негэнтропийный микромеханизм (например, запрограммированность сценариев эволюции на генетическом уровне). Вероятностное описание любого процесса в конечном счете всего лишь устанавливает его интегральные характеристики, тогда как суть явления с необходимостью обусловлена свойствами элементарных его составляющих.

8.4. Необратимость и космология

Если мы рассматриваем некоторую отдельную систему в нашей Вселенной, то, как правило, обнаружим в ней диссипативные процессы, что приводит к уходу тепловой энергии из этой системы. Эта энергия уносится материальными частицами и/или фотонами. Обычно физики не интересуются судьбой этих частиц, пока речь идет лишь об описании данной системы. Но если считать, что количество материи и энергии во Вселенной постоянно, то мы должны учитывать не только уход частиц, но и их поступление в данную систему из других систем Вселенной. В конечном счете предложенный выше вероятностный механизм перераспределения энергии в замкнутой Вселенной неизбежно должен был бы привести к ее так называемой *тепловой смерти*. Об этом красноречиво сказано в классическом учебнике [Ландау и Лифшиц, 1976]:

... если мы попытаемся применить статистику к миру как целому, рассматриваемому как единая замкнутая система, то мы сразу же столкнемся с разительным противоречием между теорией и опытом. Согласно результатам статистики Вселенная должна была бы находиться в состоянии полного статистического равновесия ... Между тем ежедневный опыт убеждает нас в том, что свойства природы природы не имеют ничего общего со свойствами равновесной системы, а астрономические данные показывают, что то же самое относится и ко всей доступной нашему наблюдению колоссальной области Вселенной.

Более того, сегодняшнее состояние Вселенной должно было возникнуть из состояния с более низкой энтропией, и т.д., следовательно, исходное ее состояние должно было иметь крайне низкую энтропию, т.е. иметь крайне малую вероятность реализации, что пока не имеет никакого объяснения, указывается далее.

Выход авторы классического учебника предлагают искать в общей теории относительности, делая замечания весьма общего характера о неприменимости понятия “стационарные внешние условия” к Вселенной в целом из-за наличия у нее гравитационных характеристик. В некотором смысле конкретизацией этой идеи (хотя и весьма радикальной) является центральная идея данной книги о том, что наша Вселенная, будучи черной дырой, *необратимо* расширяется за счет и по мере поглощения энергии *извне*.

Это и порождает глобальный общемировой процесс, связанный с так называемой космологической стрелой времени. В данной книге я попытался показать, что само время как таковое неразрывно связано с реальным направлением изменения радиуса Вселенной. Замечу, что если бы ее радиус уменьшался, время текло бы в *обратную* сторону, а если этот радиус станет постоянным, время остановится (это решающее для нашей модели утверждение вряд ли может быть проверено экспериментально - впрочем, как говорится в одной финской притче о двух соседях и их несчастьях, кто знает).

Нашей целью здесь является описание модели Вселенной, позволяющей примирить ее наблюдаемую эволюцию с законами термодинамики. Эта модель сходна с концепцией тепловой машины (непрерывного, а не циклического действия), в которой рабочее тело получает энергию от нагревателя при относительно высокой температуре и отдает энергию охладителю при относительно низкой температуре. Однако в нашем случае рабочее тело оказывается открытой системой, в которой *выходной* поток энтропии оказывается *больше, чем входной* (выходная температура меньше входной), в результате чего оказывается возможным *уменьшение* энтропии тела и прогрессивная эволюция. Процесс оказывается стационарным, что было бы невозможным в отсутствие охладителя.

Такая модель работает на уровне системы “Солнце-Земля-Космос”. Действительно, фотоны покидают поверхность Солнца при температуре порядка 6000 К, а затем после ряда трансформаций переизлучаются Землей в космическую среду с температурой, близкой в настоящее время к 3 К. Заметим, что энергия фотонов, поступающих от Солнца, частично потребляется живыми организмами, частично преобразуется в работу природных сил, а частично – в потенциальную энергию органических и неорганических природных ресурсов.

Наша основная задача – показать, что такая модель применима и для Вселенной в целом. На первый взгляд эта задача выглядит неразрешимой, так как трудно себе представить, что является для Вселенной нагревателем, а что – охладителем. Чтобы ответить на эти вопросы, должны выполняться два радикальных предположения.

Первое предположение сводится к ранее высказанному нами тезису о том, что наша Вселенная не является замкнутой системой, а представляет собой гипермассивную растущую черную дыру (ЧД) в некотором “материнском” мире, который принципиально недоступен обычному наблюдателю. Рассмотренная ЧД оказывается именно расширяющейся Вселенной, причем ее расширение обусловлено исключительно ростом массы, поступающей в нее извне. *Поглощение* внешней материи и энергии связано с ростом “внешней” энтропии ЧД (т.е. поверхности ее горизонта событий). Таким образом, “материнский” мир вполне может играть роль *нагревателя* для нашей Вселенной.

Второе предположение связано с выбором кандидата на роль *охладителя*. В этой связи полезно вспомнить, что в центре галактик, как правило, размещаются сверхмассивные черные дыры с массой порядка 10^6 солнечных масс. Как известно [Bekenstein, 2003], температуру горизонта событий черной дыры можно оценить по формуле $T_{\text{чд}} \sim 10^{26}/M$, где M – масса ЧД в граммах, а температура выражена в Кельвинах. Поскольку одна солнечная масса составляет 10^{33} г, то температура сверхмассивных ЧД не превышает ничтожных долей Кельвина, т.е. очень близка к абсолютному нулю (заведомо меньше 2.72 К) и обеспечивает весьма высокую эффективность работы такого охладителя для своей галактики.

Недавно появилась работа [Egan and Lineweaver, 2009], в которой приведена подробная оценка вклада в энтропию Вселенной различных компонент. “Внешняя” энтропия, т.е. энтропия космического горизонта событий, составляет порядка $10^{123} k$ (где k – постоянная Больцмана), тогда как “внутренняя” энтропия не превышает $10^{103} k$. Основной вклад во внутреннюю энтропию вносят именно крупнейшие сверхмассивные ЧД в центре галактик, тогда как ЧД со звездной массой обладают энтропией порядка $10^{95} k$, фотоны и реликтовые нейтрино – порядка $10^{88} k$, и т.д.

Заметим также, что как ЧД, так и сформировавшиеся звезды и галактики, являясь сильно гравитирующими физическими системами, обладают *отрицательной* теплоемкостью. Иными словами, звезды излучают свою энергию и *нагреваются*, а ЧД поглощают эту энергию и

охлаждаются. Таким образом, различие температур и удаленность от равновесного состояния в галактиках в течение миллиардов лет должны не уменьшаться, а нарастать.

8.5. Энтропия и гравитация

Приведенное выше общее замечание Л.Д.Ландау и Е.М.Лифшица о связи энтропии и гравитации можно развить довольно неожиданным образом.

В 70-х годах прошлого века Я. Бекенштейн установил, что черные дыры должны обладать огромной энтропией, пропорциональной площади ограничивающей их сферы – горизонта событий. В работе [Bekenstein, 2003] он писал (перевод мой – М.Х.Ш.):

... черная дыра с массой, равной массе Солнце, имеет энтропию, большую [примерно на 20 порядков], чем энтропия звезды той же массы, которая могла бы быть ее предком. Но почему энтропия дыр должна быть больше на много порядков? Принцип Больцмана, утверждающий, что энтропия системы равна логарифму от числа микроскопических конфигураций, совместимых с макроскопическими параметрами системы, вместе с принципом “[у черной дыры] нет волос”, предполагает, что энтропия черной дыры больше потому, что состояние черной дыры не может сообщить нам точно, благодаря росту какой именно системы она образовалась. Эта огромная утрата “структурной информации” относительно специфических микроскопических конфигураций может быть причиной огромной энтропии черной дыры, так что черная дыра оказывается причиной колоссальной утраты информации.

Автор недавно опубликованной статьи [Verlinde, 2010] показал, что связь между тяготением и энтропией может существовать не только для ЧД, но и для “обычных” массивных тел, далеких от гравитационного коллапса. Он ввел для каждого такого тела представление о гипотетическом сферическом экране, несущим информацию о нем и окружающем это тело, и предположил, что силы гравитации имеют не фундаментальный, а вторичный характер, будучи в точности обусловленными по величине возникающим градиентом энтропии при изменении радиуса экрана.

Однако допущение о присутствии подобного “голографического” экрана, несущего информацию, не кажется достаточно обоснованным³¹. С другой стороны, наличие несомненной связи между гравитацией и энтропией вовсе не обязательно должно приводить к идее о первичности именно энтропии. Так, авторы [Porcelli and Scibona, 2010] показывают, что нет оснований однозначно считать энтропию источником гравитации, поскольку правомерна и другая точка зрения: термодинамическое уравнение состояния может быть выведено на основании уравнений теории тяготения.

Я утверждаю, что гравитационное поле может создавать условия для возникновения градиентов энтропии не только в случае черных дыр, но и в случае “обычных” массивных тел.

Пусть тело с массой M создает *центрально-симметричное* поле тяготения с потенциалом $\Phi(r) \sim 1/r$. Как известно, поле на расстоянии r от такого источника определяется только той частью массы, которая сосредоточена *внутри* сферы этого радиуса. По аналогии с тем, как это принято для горизонта ЧД, мы можем сформулировать данное утверждение несколько иначе: *поле на расстоянии r определяется эквивалентным поверхностным гравитационным зарядом σ для сферы такого радиуса, причем одна и та же эквивалентная величина σ может соответствовать очень большому числу конфигураций реального распределения масс внутри сферы.*

Говоря иначе, для наблюдателя, связанного с пробной частицей, всегда имеется реальная неопределенность в распределении массы центрального источника – взаимодействие пробной частицы с источником силы просто физически не способно предоставить большей информации об этом распределении. При заданной величине этой массы неопределенность зависит от

³¹ См., в частности, интересную статью [Myung et al., 2010].

расстояния между пробной частицей и центром источника. Поскольку напряженность гравитационного поля может быть выражена через эквивалентный поверхностный гравитационный заряд, то энтропия, отвечающая поверхности соответствующей сферы, совпадет с (безразмерной, выраженной через квадрат планковской длины) площадью поверхности сферы.

Сказанное можно сформулировать и в терминах термодинамики. Как известно, приращение энергии/работы dW можно представить в виде произведения обобщенной силы на приращение обобщенной координаты. Например, это может быть произведение обычной силы (например, тяготения) на перемещение вдоль координаты ($dW=F \cdot dx$), или произведение давления (газа) на приращение объема ($dW=p \cdot dV$). Но с таким же успехом это может быть и произведение температуры (удельной энергии на единицу поверхности) на приращение площади поверхности ($dW=T \cdot dA$), так что последняя вполне может выполнять функцию энтропии.

Следуя примеру Бекенштейна, рассмотрим падение пробной частицы на источник поля тяготения. Пусть пробная частица пересекает мысленную сферу определенного радиуса, окружающего источник (в данном случае – не черную дыру). Для другой пробной частицы вне этой сферы дело выглядит так, что масса источника увеличилась за счет первой пробной массы и, соответственно, увеличилось число возможных конфигураций распределения массы внутри указанной сферы. То есть первая пробная масса привносит в сферу связанную с ней энтропию, что в точности напоминает ситуацию с черной дырой.

Попробуем связать воедино формулы для температуры и энтропии, относящиеся к обычному массивному телу (массы M и радиуса r) и к черной дыре (с массой M и радиусом $r_G=2GM/c^2$), где G – гравитационная постоянная. Для *температуры* можно использовать формулу Унру

$$T_U = (\hbar/2\pi ck)a$$

где a – ускорение. В нашем случае ускорение имеет гравитационную природу и создается массой M , так что

$$T_U = (\hbar/2\pi ck)GM/r^2$$

где c – скорость света, k – постоянная Больцмана, $\hbar$ – постоянная Планка. Эта температура³² в точности аналогична температуре Хокинга на горизонте событий черной дыры

$$T_H = (\hbar/2\pi ck)\sigma$$

где $\sigma = M/4\pi(r_G)^2$ – поверхностный гравитационный заряд для ЧД Шварцшильда ([Good, 2006]). Во избежание недоразумений напомним, что $r_G \sim M$, так что в конечном счете $T_H \sim (1/M)$, как и должно быть для горизонта событий черной дыры Шварцшильда. Однако для обычного (не коллапсирующего) тела $T_U \sim M$ и совпадает с температурой T_H только при коллапсе.

Заметим, что обычно с температурами T_H и T_U связывают тепловое излучение, имеющее *квантово-полевую* природу. Я рискну предположить, что возможен и альтернативный – “классический” – механизм этого излучения. Действительно, электромагнитное излучение заведомо должно генерироваться при ускорении (кинематического или гравитационного происхождения) носителей зарядов, которые входят в состав атомов и молекул, расположенных на поверхности тела или вблизи ее. Обычно ускорение вблизи реальных объектов, обусловленное их тяготением, достаточно мало, поэтому температура этих объектов (кроме микроскопических черных дыр) исключительно низка (порядка 10^{-20} К и менее).

Теперь попробуем определить зависимость для *энтропии*. Для черной дыры Шварцшильда энтропия пропорциональна площади горизонта событий. В подходе Верлинде энтропия голографического горизонта также пропорциональна его площади, однако это приводит к фундаментальному парадоксу, который заметил и сам Верлинде: если коэффициент

³² Численное значение данной температуры на поверхности тел в нашей Вселенной колеблется от 10^{-15} до 10^{-30} К.

пропорциональности одинаков, то энтропия черной дыры оказывается намного *меньше* энтропии обычного тела, поскольку его гравитационный радиус много меньше фактического!

Для устранения этого парадокса я предлагаю *ввести* в коэффициент пропорциональности, связывающий площадь горизонта и энтропию произвольного тела, *дополнительный множитель вида* $(\rho/\rho_{\text{кр}})$, где ρ – фактическая плотность тела, $\rho_{\text{кр}}$ – “критическая” плотность сколлапсировавшего тела такой же массы. Этот множитель, например, для Земли составляет 10^{-26} , для Солнца – порядка 10^{-16} , тогда как для Вселенной в целом он близок единице (см. таблицу в разделе 3.11). Очевидно, такой множитель эффективно увеличивает энтропию тела при его приближении к состоянию коллапса. Кроме того, он естественным образом учитывает прямую корреляцию энтропии с массой вещества, заключенной под мысленной сферой с площадью поверхности A , окружающей тело.

Таким образом, предлагаемая мной формула для энтропии S любого тела (в том числе и ЧД) принимает вид:

$$S = c^3 A \rho / 4 G \hbar \rho_{\text{кр}}$$

Заметим, что площадь A пропорциональна квадрату радиуса сферы, а плотность ρ обратно пропорциональна (при заданной массе) кубу этого радиуса, поэтому в конечном счете энтропия S обратно пропорциональна радиусу сферы, т.е. *возрастает с уменьшением радиуса*. Отсюда следует важный результат: процесс взаимного притяжения массивных тел приводит к *увеличению их суммарной энтропии*, т.е. соответствует направлению времени, отвечающему второму началу термодинамики.

К аналогичному выводу приводят и “энергетические” соображения: предоставленная самой себе пробная частица притягивается к источнику поля тяготения, стремясь минимизировать разность гравитационных потенциалов между своим текущим положением и поверхностью источника. Если же пробная частица вращается с постоянной скоростью вокруг источника поля тяготения, то минимизируется алгебраическая сумма гравитационной и кинетической энергии, в результате чего вращение происходит по соответствующей стационарной орбите. Мы приходим к следующим важным заключениям.

- Для любой массивной частицы естественным образом возникает градиент энтропии, направленный вдоль радиуса ее поля тяготения. Более того, это явление может быть характерно вообще для источника центрально-симметричного поля любой природы, например, электростатического. В этом смысле связь между “фундаментальной” силой и энтропией вовсе не является привилегией гравитационного взаимодействия, поэтому концепция Верлинде не кажется мне состоятельной.
- Предложенное мной обобщение зависимости для энтропии позволяет описывать с ее помощью как “обычные состояния” массивных тел с относительно небольшой энтропией мысленного горизонта охватывающей поверхности, так и состояние черной дыры с огромной энтропией на горизонте событий. При этом естественным образом объясняется природа знаменитого “голографического принципа” и определяются поправки к значениям энтропии для всего спектра астрофизических объектов. Заметим, что отношение (ρ/ρ_0) для различных астрофизических объектов нарастает, как следует из таблицы в разделе 3.11, от 10^{-26} для Земли до 1 при переходе ко Вселенной в целом
- Силы тяготения определяют естественное направление эволюции систем, отвечающее второму началу термодинамики.

8.6. Необратимость и электромагнитное излучение

Специально остановимся на проблеме необратимости применительно к электромагнитному излучению. Первый вопрос, который здесь кажется очевидным, это выделенное направление времени при макроскопическом излучении. В традиционной электродинамике это непосредственно связано с выбором одних лишь запаздывающих

потенциалов. В трактовке же Уилера – Фейнмана это обусловлено ролью поглотителя в качестве фактора *несимметрии*. Действительно, попытка устранить несимметрию за счет введения опережающих потенциалов наравне с запаздывающими тут же оборачивается скрытым поражением, т. к. поглотителю приписывается существенно несимметричное поведение во времени. С одной стороны, любое излучение первичного источника поглощается с течением времени в положительном направлении, т.е. *в будущем*. С другой стороны, воздействие на первичный заряд в виде излучения вторичных зарядов *из прошлого* принимается равным нулю. Если инвертировать ситуацию, допустить отсутствие поглотителя в будущем и, наоборот, наличие излучающей среды в прошлом, то в конечном соотношении останутся лишь *опережающие* слагаемые.

Итак, осциллирующий заряд, окруженный поглощающей средой, *теряет* энергию вследствие излучения. Почему же эта несимметрия возникает в рамках классической электродинамики, уравнения которой изначально симметричны относительно прошлого и будущего? Использование одного только запаздывающего члена Ритца и Тетраде связывали со вторым началом термодинамики на уровне каждого индивидуального элементарного акта, тогда как Эйнштейн считал эту связь с необратимостью сугубо статистической. Уилер и Фейнман вместе с Эйнштейном также приходят к выводу, что необратимость процесса излучения представляет собой феномен статистической механики, связанный с *необратимостью начальных условий относительно направления времени*.

Только несимметрией начальных условий может быть, повидимому, объяснена направленность во времени процесса эмиссии энергии. В этом случае получается решение уравнения движения, соответствующее обычно используемому. И в этом нет ничего, противоречащего физической интуиции, поскольку при рассмотрении антенны, принимающей излучение из внешней среды, ситуация становится в точности обратной, если только считать процессы излучения и поглощения *идеальными*. Идеальным, в частности, является случай, когда мы исследуем *изолированную* систему двух микроскопических объектов – атомов, один из которых испустил фотон, а другой непосредственно поглотил этот же фотон. Процесс излучения обратим на микроскопическом уровне (вероятность излучения равна вероятности поглощения).

В то же время *реальный* макроскопический излучатель теряет энергию *не только* на излучение во внешнюю среду, но и на радиационное трение. *Первая* составляющая связана с числовыми значениями параметров *внешней* распределенной среды (магнитная и диэлектрическая проницаемость), т.е. с импедансом вакуума (при обращении ситуации эта же энергия принимается антенной из внешней среды). *Вторая* составляющая связана с неидеальностью колеблющегося заряда как источника энергии, конечностью запаса этой энергии. Как уже отмечалось выше, на языке электротехники ситуацию можно изобразить эквивалентной схемой, в которой “идеальный” источник электродвижущей силы нагружен на импеданс вакуума последовательно с собственным (отличным от нуля) импедансом.

Необратимость радиационных потерь создает интересную коллизию. Такие потери обычно (в механических, электротехнических и иных процессах) связывают с тепловым излучением, навсегда уносящим энергию из рассматриваемой системы. В данном же случае, во-первых, исходный процесс сам по себе является излучением, а во-вторых область, где этот процесс происходит, занимает ничем теоретически не ограниченную область пространства, т.е. всю Вселенную. Поэтому остается считать, что исходное излучение первичного заряда в некоторой своей части трансформируется в хаотическую компоненту произвольной частоты и направления, выпадающую из направленного поля излучения и не учитываемого в относящемся к ней балансе энергии.

Второй вопрос возникает, если все же принять подход Фейнмана-Уилера, основанный на реальном существовании опережающего воздействия, т.е. на том, что наряду с обычным *запаздывающим* действием частицы **a** на **b**, возможно также и *опережающее* действие **b** на **a**. Это приводит к хорошо известным временным парадоксам, при которых событие-следствие загадочным образом могло бы влиять на событие-результат и даже предотвратить его, что само

по себе абсурдно. Чтобы решить парадокс, следует, по мнению Уилера и Фейнмана, дополнительно декларировать принцип запрета на подобные замкнутые во времени (петлеобразные) цепочки событий. По моему же мнению, опережающее действие, если бы оно имело место в макроскопических масштабах, вступило бы в гораздо более радикальное противоречие с действительностью, и подобным сравнительно слабым запретом такого противоречия избежать бы не удалось. Если уже Лапласовский детерминизм полностью исключает *различные* варианты дальнейшей эволюции Вселенной, сохраняя лишь один из них, то встречный детерминизм опережающего воздействия всего на все, как мне кажется, просто заблокировал бы какую бы то ни было эволюцию вообще!

8.7. Специфика необратимости в квантовой теории

В квантовой механике проблема необратимости приобретает специфические и принципиальные особенности. Важность этой проблемы детально обрисовал Джон фон Нейман в знаменитой монографии [**фон Нейман, 1932**]. Он рассмотрел эволюцию квантовой системы и указал два ее возможных типа (1 и 2). Если процесс 2 (U-процедура по классификации Р. Пенроуза) соответствует унитарной эволюции и обратимому уравнению Шредингера, то процесс 1 (R-процедура по классификации Р. Пенроуза) отвечает необратимому процессу измерения, при котором реализуется только одна из квантовых альтернатив, т.е. происходит неунитарная редукция (коллапс) волновой функции. С такой R-процедурой связан целый комплекс проблем, которые не только выходят на все более заметный план, но и активно исследуются в последние десятилетия экспериментально.

Одной из таких ключевых проблем при этом является следующая: почему наш мир “классичен” (т.е. почему в обычной жизни мы никогда не встречаем системы в состоянии квантовой суперпозиции, а только лишь в одном из альтернативных состояний)? Заметим, что этот вопрос имеет и весьма практическое значение, поскольку в квантовых компьютерах используются именно состояния с суперпозицией, которые не только должны храниться в течение произвольного времени, но и подвергаться операциям, не приводящим к утрате их специфически квантового статуса.

Претензии на решение этой проблемы активно декларируются современным научным направлением, которое принято называть теорией декогеренции. Вот что пишет один из активных создателей этой теории [**Зурек, 2002**] (перевод мой – М.Х.Ш.):

Проблема измерения имеет долгую и очень занимательную историю. Первое широко распространенное объяснение того, как единственный вариант возникает из множества потенциально возможных, было предложено копенгагенской интерпретацией, данной Нильсом Бором, который утверждал, что для выявления результата измерения необходим классический прибор. Таким образом, квантовая теория объявлялась неуниверсальной. Ключевым моментом копенгагенской интерпретации является разделительная линия между квантовой и классической теориями. Бор подчеркивал, что этот водораздел должен быть подвижным, так что даже “оконечный прибор” – человеческая нервная система – в принципе может быть измерена и проанализирована в качестве квантового объекта, имея в виду, что подходящее классическое устройство может быть выбрано в зависимости от задачи.

В отсутствие жесткого критерия для выявления различия между квантовыми и классическими объектами часто использовалось отождествление классического объекта с макроскопическим. Неадекватность этого подхода стала понятной только в результате относительно недавних исследований: криогенный вариант шины Вебера (Weber bar) – гравитационно-волновой детектор – должен рассматриваться как квантовый гармонический осциллятор даже в предположении, что он может весить тонну. Неклассические конденсированные состояния могут описывать колебания подходящим образом приготовленных электромагнитных полей с макроскопическим числом фотонов. Наконец,

квантовые состояния, связанные с токами в сверхпроводящих переходах Джозефсона, порождают макроскопическое число электронов, но все еще могут туннелировать через минимум эффективного потенциала, отвечающего противоположному направлению вращения.

Но если макроскопические системы не могут всегда использоваться в качестве надежно установленного классического объекта, то, может быть, границы между классическими и квантовыми объектами вообще не существует? ...

Несмотря на глубокие корни указанных трудностей, в последние годы выявился растущий консенсус относительно того, что прогресс может быть достигнут при увязке этих вопросов с общей проблемой измерения (обычный эвфемизм для коллекции интерпретационных головоломок, описанных выше). Выявился ключевой (и бесспорный) факт, восходящий едва ли не к началам квантовой теории, однако его значение для перехода от квантовой к классической области было осознано лишь теперь: макроскопические системы никогда не изолированы от своего окружения. Поэтому ... не следует ожидать, что они подчиняются уравнению Шредингера, которое справедливо лишь для замкнутой системы. Как следствие, системы, обычно рассматриваемые как классические, естественным образом теряют квантовую когерентность, которая как бы “вытекает” в их окружение. Результирующая “декогеренция” не может игнорироваться, когда речь идет о проблеме редукции квантовомеханического волнового пакета: декогеренция действительно накладывает соответствующее “embargo” на потенциально возможные исходы, позволяя наблюдателю регистрировать потенциально возможные альтернативы, но следуя лишь одной из ветвей – одной из “декогерентных историй” в терминологии М. Гелл-Манна.

Теория декогеренции предлагает следующий инструментарий для решения проблемы. Во-первых, в качестве *средства* описания квантовой системы, ее представителя, используется не сама волновая функция системы, а получаемая из нее матрица плотности (для чистых, т.е. не смешанных, состояний эти два описания эквивалентны). Матрица плотности имеет то преимущество, что в ней явно присутствуют *недиагональные* члены, ответственные за интерференцию различных базисных состояний, т.е. за состояние суперпозиции как таковое. Поэтому переход от состояния суперпозиции к (классической) смеси состояний теория декогеренции предлагает трактовать как переход к новой матрице, в которой остаются только диагональные члены, а недиагональные члены с течением времени более или менее быстро стремятся к нулю.

Во-вторых, теория декогеренции предлагает аппарат для количественного исследования именно самого процесса, приводящего к исчезновению недиагональных членов. С этой целью строятся те или иные модели и выписываются соответствующие уравнения, описывающие *взаимодействие с окружающей средой*. В таких уравнениях слева фигурирует производная матрицы плотности по времени, а справа, наряду с обычным коммутатором матрицы плотности и гамильтониана, вводятся дополнительные слагаемые, ответственные за “классическую” диссипацию и за специфически квантовую декогеренцию. Таким образом необратимость, по существу, закладывается непосредственно в основу данного подхода, а в ходе его реализации действительно удается получить *количественное* описание процесса декогерентизации, имеющего много общего с процессом диссипации. Очень подробное и интересное описание этого и смежных подходов можно найти на русском языке в содержательных обзорах [Менский, 1998, 2003].

В уже цитировавшейся мною работе [Зурек, 2002] ее автор пишет далее:

С 1991 г. была проделана большая работа по исследованию основного уравнения и его модификаций для различных случаев... Возможно, наиболее важное развитие изучение декогеренции получило в экспериментальной области. За прошедшее десятилетие был осуществлен ряд экспериментов по изучению декогеренции в разных системах. В частности, Michel Brune, Serge Haroche, Jean-Michel Raimond и их коллеги из Ecole Normale

Suprieure в Париже ... осуществили серию экспериментов в микрополостях, в которых они манипулировали электромагнитными полями над суперпозициями типа “кошки Шредингера”³³, используя атомы рубидия. Они исследовали процесс разрушения квантовой когерентности. Эти эксперименты подтвердили основные положения теории декогеренции. С тех пор французские ученые использовали ту же самую технику для внедрения различных квантово-информационных технологий. Они совершенствуют свое оборудование, создавая все более “крупных” кошек Шредингера и изучая процесс их декогеренции.

Немного позже Wineland, Monroe и их сотрудники ... использовали замороженные ионы (Ion traps) (в связи с внедрением фрагмента разработки для квантовых вычислений) для изучения декогеренции ионов под действием излучения. И снова теория была подтверждена, дальнейшее развитие статуса декогеренции и как ключевого элемента объяснения возникающей “классичности”, и как угрозы для квантовых вычислений. Дополнительно к этим новым моментам, которые при проверке различных аспектов декогеренции, обязанных реальной и имитированной существенной среды ... , Pritchard и его сотрудники из Массачусетского технологического института осуществили красивую серию экспериментов с использованием атомной интерферометрии, исследуя роль передачи информации между атомами и фотонами Наконец, “аналоговые эксперименты”, моделирующие поведение уравнения Шредингера в оптике ... выявили некоторые другие тайные закоулки пространства параметров.

В дополнение к этим существенным экспериментам по мезоскопической декогеренции объектов типа кошки Шредингера, в некоторых лабораториях были исследованы значительно более существенные “кошки” (например, зеркала в суперпозициях квантовых состояний).

Итак, классичность измерительного прибора теория декогеренции связывает с его ролью посредника между квантовой системой и внешней средой. Т.е. как бы сама по себе квантовая система не способна перейти в состояние смеси (или, по крайней мере, вероятность этого не слишком велика), но это становится крайне вероятным под воздействием окружения (так же многие родители пытаются объяснить плохое поведение своих чад). Если же включить рассматриваемый объект в состав более широкой системы вместе с определенной частью окружения, то для этой расширенной системы можно надеяться обойтись вполне обратимой моделью поведения и U-эволюцией по Шредингеру.

Однако при этом возникает та же проблема, что и при объяснении “классической” необратимости. Если считать для определенности Вселенную конечной и замкнутой, то рано или поздно мы будем вынуждены расширить рассматриваемую систему до размеров всей Вселенной, и нам потребуются принципиально иное объяснение необратимости. Здесь, конечно, дело заключается не в конечности, а в замкнутости Вселенной, т.е. в предположении о том, что ее полная энергия остается неизменной. Как мне представляется, именно это предположение оказывается несостоятельным, а отказ от него приводит к идее, восходящей к Козыреву и обосновываемой в настоящей книге. Согласно ей, в *каждой* точке Вселенной с течением времени возникает прирост энергии и, как следствие, негэнтропийные потоки. Особенностью этого процесса, как можно теперь заключить, являются дополнительные “квантовые” нюансы: всегда и повсеместно энтропийному процессу *декогеренции* противостоит (инициируя его) антиэнтропийный процесс *генерации квантовых объектов, находящихся в состоянии суперпозиции*. Здесь, правда, предстоит прояснить еще очень и очень многое.

³³ Имеются в виду объекты с двумя базисными состояниями (М.Х.Ш.)

8.8. С.Хокинг о психологической стреле времени

Остановимся в заключение на совпадении направлений термодинамической стрелы с *психологической*. В общем можно согласиться с аргументацией С.Хокинга [Хокинг, 1990], цитату из книги которого я с удовольствием воспроизвожу:

Я докажу, что психологическая стрела определяется термодинамической и обе эти стрелы направлены одинаково... Мне кажется вполне логичным предположить, что и у компьютеров, и у людей психологическая стрела одна и та же. Если бы это было не так, то, имея компьютер, который помнил бы завтрашний курс акций, можно было бы прекрасно играть на бирже... (Для запоминания)... надо затратить некоторое количество энергии... Эта энергия перейдет в тепло и тем самым увеличит степень беспорядка во Вселенной. Можно показать, что это увеличение беспорядка будет всегда больше, чем упорядочение самой памяти. Необходимость охлаждения компьютера вентилятором говорит о том, что, когда компьютер записывает что-то в память, общий беспорядок во Вселенной все-таки увеличивается. Направление времени, в котором компьютер запоминает прошлое, оказывается тем же, в котором растет беспорядок.

Итак, у демона Максвелла нет никаких шансов!

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настало время подвести некоторые итоги, которые, возможно, представят некоторый интерес не только для того, кто мужественно дочитал книгу до этого места, но и для нетерпеливого читателя, сразу заглянувшего в ее конец (автор и сам так иногда поступает).

Прежде всего, я хотел бы со всей определенностью заявить, что ни развитие современной физики вообще, ни идеи, лежащие в основе данной работы, невозможно представить себе без специальной и общей теории относительности Альберта Эйнштейна, в числе первых пришедшего к концепции единого пространственно-временного континуума, геометрия которого в общем случае может быть неевклидовой. Тем, кто дал себе труд прочесть написанное выше, понятно, что в этом смысле данная работа является попыткой развития, некоторого переосмысления, но уж никак не отрицания или опровержения теории относительности.

Едва ли в начале 21-го века найдется консерватор от науки, который в принципе не допускал бы возможности какой-либо модификации или ревизии СТО и ОТО. В качестве известного мне примера попытки обобщения ОТО сошлюсь, например, на [Шипов, 1993]. Вопрос заключается, очевидно, лишь в том, достойна ли внимания та или иная конкретная попытка сделать это. Стало уже традицией, что каждый претендент защищает свою концепцию по таким критериям, как согласие в первом приближении с известными фактами, обоснованная критика общепринятой парадигмы, объяснение необъясненных и предсказание новых явлений.

Читатель моей книги должен был заметить, что предлагаемые в ней идеи в первом приближении действительно соответствуют идеям Эйнштейна и даже, как я выше отметил, не могли бы быть найдены без осмысления положений теории относительности. Что же касается критики общепринятой парадигмы, то я, как автор, должен сознаться в несомненной дерзости, поскольку подверг ревизии такие неприкасаемые догматы, как принцип относительности, принцип эквивалентности и закон сохранения энергии. Попробую оправдаться.

Принцип относительности является очень красивым математическим принципом, декларирующим равноправие систем отсчета. Физический же смысл этого принципа должен объясняться либо волей Создателя, которому важно, чтобы в его владениях царила демократия по отношению ко всем возможным наблюдателям, либо каким-либо еще экзотическим образом, что делает этот самый принцип достаточно уязвимым для критики. Взамен мной предложена наглядная геометрическая модель, в которой принцип относительности сводится к приближенному выполнению теоремы Пифагора для достаточно малых величин абсолютной скорости по отношению к *выделенной* системе отсчета, которая существует в любой точке пространства.

Принцип эквивалентности Эйнштейна является теоретическим постулатом, основанным на эмпирическом факте пропорциональности гравитационной и инертной массы. Однако этот принцип, как я попытался показать выше, неявно базируется еще на одной предпосылке, которая состоит в использовании представлений механики точечной частицы. Иными словами, принцип эквивалентности, использующий идею локально однородного поля, справедлив только для области пространства, размеры которой существенно больше, чем собственные размеры частицы, помещенной в поле внешнего источника. Если же гравитационный радиус пробного тела близок по величине к размеру области, в которой локализовано поле внешнего источника, то необходимо использовать более мощный понятийный и математический уровень механики сплошной среды. Крайне важно, что мы сталкиваемся именно с такой ситуацией в двух противоположных, как кажется на первый взгляд, предельных случаях - при рассмотрении Вселенной в целом и в задачах гравитационного коллапса.

Учет влияния собственного гравитационного поля материальных тел производится путем непосредственной и открытой легализации статического давления гравитирующей материи, что в некотором смысле равносильно введению в уравнения Эйнштейна знаменитой космологической постоянной. Выдающимся результатом такой модификации уравнений для

нестационарного случая оказывается появление нового замечательного решения, которое практически позволяет отождествить физическое Время с эволюцией радиуса кривизны Вселенной, а плотность материи – с самой величиной этого радиуса. Но высока и плата за новое решение - в нем масса покоя Вселенной не сохраняется во времени, а изменяется по линейному закону. Что же, это катастрофа для новой концепции?

Обратившись к теоретическому обоснованию закона сохранения энергии (в классической механике), опирающемуся на однородность времени, уместно спросить – а можно ли говорить об однородности времени для Вселенной с изменяющимся радиусом кривизны? Мне кажется, что ответ может быть только отрицательным, поэтому консерватизм в неаргументированном отстаивании закона сохранения энергии можно поставить в один ряд с судьбой пятого постулата Евклида. И, разумеется, нет никакого конфликта с реальностью – отклонение от закона сохранения составляет порядка 10^{-10} . Нет и ущерба для логики научной теории, так как на смену одному закону (сохранения) приходит новый закон (линейной эволюции), а не произвол и неопределенность.

Перехожу к объяснению необъясненных и предсказанию новых явлений. Для меня и тем и другим одновременно оказался феномен анизотропии реликтового излучения и связанное с ним наличие выделенной системы координат (см. раздел 5). К осознанию необходимости существования выделенной системы отсчета меня привели чисто теоретические соображения, однако сильно смущало видимое противоречие с общепринятой системой взглядов (и всеми известными мне экспериментами). Осенью 1996 года я рассказал об этой проблеме А.В.Московскому, который вспомнил, что он что-то читал об этом в [Вайнберг, 2000]. Затрудняюсь передать свое удивление и вспыхнувший энтузиазм после прочтения комментария Я.Б.Зельдовича к проблеме анизотропии фонового излучения, но это был психологически решающий момент в моей работе!

Что касается новых экспериментальных результатов, которые могли бы подтвердить новую концепцию, то я предполагаю, что они могут быть получены именно для тех двух предельных классов ситуаций, о которых уже говорилось выше. Это класс эффектов, характерных для Вселенной в целом (подобно анизотропии излучения), а также явления, связанные с гравитационным коллапсом или очень сильными гравитационными полями, разумеется, после построения правильной количественной теории, учитывающей статическое давление.

К настоящему времени накопился ряд серьезных доводов, побуждающих, с моей точки зрения, отдать предпочтение ТШРВ, а не стандартной космологической модели (СКМ). Рассмотрим их.

Прежде всего, это (геометрическое) объяснение факта существования предельной физической скорости (раздел 4.1).

Далее, при обосновании СКМ возникают трудности с космологической постоянной, проблема энергии вакуума. При этом оценка энергии вакуума оказывается на 122 порядка меньше, чем дают квантово-механические расчеты (раздел 3.10).

Твердо установлен феномен дипольной анизотропии реликтового излучения, порождающий сомнения в изотропности Вселенной и, соответственно, в справедливости фундаментальных представлений теории относительности о равноправии инерциальных систем отсчета и отсутствии какой-либо выделенной системы отсчета. Предлагаемая нами модель такое представление и тест для его проверки предлагает (разделы 5.3, 5.4).

Между тем, на вращающиеся системы отсчета указанное представление теории относительности явно не распространяется, что подтверждается хорошо и давно известными опытами с гироскопами и др. В разделе (5.5) я утверждаю, что в действительности при полном облете замкнутой Вселенной различие между прямолинейным и вращательным движением вообще исчезает. И это не только теоретическое рассуждение: в разделе 3.13 показано, что подобный облет Вселенной реликтовыми фотонами должен приводить к пику в начале температурного спектра мощности (при $l \approx 5$) космического фонового излучения, который

реально наблюдается, но не имеет никакого общепринятого объяснения в современной космологии.

Достижением СКМ считается правильное определение положения основного пика спектральной мощности реликтового излучения. Обосновывая это значение, СКМ приписывает геометрии Вселенной *евклидов* характер, т.е. обосновывает *плоскостность* Вселенной и равенство между фактической и критической плотностью материи в ней. Однако в разделе 3.12 нами показано, что правильное значение соответствующего угла (0.6°) может быть найдено совершенно независимо от гипотезы о евклидовости метрики Вселенной, а вывод СКМ содержит всего лишь необходимое, но не достаточное условие для получения правильного результата. При этом, как отмечает Вайнберг, имеются наблюдательные подтверждения того, что фактическая плотность в два раза больше критической плотности материи.

Важным космологическим тестом является зависимость от красного смещения углового размера наблюдаемых галактик (3.15). Опубликованы работы, в которых показано, что экспериментальные данные не соответствуют предсказаниям СКМ. Нами проделаны теоретические исследования, где фактически удалось добиться неплохого совпадения предсказаний ТШРВ с данными наблюдений при определенных допущениях.

В стандартной космологической модели тот факт, что при данном красном смещении далекие сверхновые типа Ia кажутся темнее, чем ожидалось, приписывается положительному космологическому члену $\Lambda \approx 0.73$ и, соответственно, ускоренному расширению Вселенной в настоящую эпоху (значение 0.73 и подобрано так, чтобы предсказание теории совпало с результатом наблюдений). В ТШРВ не требуется использовать “свободный” параметр, она непосредственно дает результат, который в пределах погрешности наблюдений совпадает с предсказанием СКМ и результатами наблюдений (раздел 3.14). Ускоренного же (или замедленного) расширения Вселенной в ТШРВ не может быть по определению, так что наша эпоха в этом смысле ничем не отличается от любой другой.

Важнейшим достижением новой концепции я считаю прояснение представлений о сущности времени и движения. Впервые факт течения времени в качестве явного постулата введен в теорию и отождествлен с расширением сферической 3-мерной Вселенной в 4-мерном пространственно-подобном континууме. Впервые представление о трехмерных движениях бесчисленного множества тел сведено к единственному процессу расширения 3-мерной оболочки, “пронзаемой” мировыми линиями, откуда следуют и закон Хаббла, и новые физические представления о движении.

Опираясь на объективное существование волн де Бройля, мы сформулировали также гипотезу о массе как о квантовом числе, возрастающем одновременно с радиусом Вселенной. Последнее утверждение, в свою очередь, дало основание отказаться от принципа сохранения во времени массы и энергии Вселенной и заменить модель “большого взрыва” в момент рождения Вселенной на концепцию “энергетического насоса”.

Новая концепция времени, как было показано, связана с космологической необратимостью эволюции. Реальное расширение Вселенной есть первоисточник космологической необратимости, позволяющий через измерение кривизны пространства объективно регистрировать ход времени. С ростом возраста и размера Вселенной связан рост ее массы и энергии. Он происходит неравномерно - чем больше масса тела, тем больше абсолютный ее прирост в единицу времени. Именно поэтому генератором эволюции являются звезды, изливающие энергию в окружающую среду. С другой стороны, поля, распространяющиеся со скоростью света, выравнивают температуру среды и создают встречные (т.е. вторичные) энтропийные потоки, рождая у наблюдателей иллюзии о неизбежном наступлении тепловой смерти Вселенной. Трудно недооценить роль подобного конструктивного ответа (если он, конечно, соответствует истине) на вопросы, поставленные наукой много десятков лет тому назад.

И, наконец, еще об одном важном обстоятельстве. В публикациях ряда ведущих теоретиков ОТО часто приходится встречаться с утверждением о необходимости ограничиться лишь анализом локального “гравитационного рельефа” в локальных же системах координат, о

бессмысленности попыток построить глобальную картину Вселенной. Я убежден в противоположном и надеюсь, что предложенная мною модель может служить основанием для такой уверенности.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [**Abramowicz and Bajtlik, 2009**] Abramowicz M. and Bajtlik S. Adding to the paradox: the accelerated twin is older. arXiv:0905.2428v1 [physics.class-ph] 14 May 2009. См. русский перевод по ссылке www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Twin_paradox_news.pdf
- [**Barger et al., 2008**] A. J. Barger, L. L. Cowie, W.-H. Wang. A HIGHLY COMPLETE SPECTROSCOPIC SURVEY OF THE GOODS-N FIELD. ArXiv:0812.2481v1 [astro-ph] 12 Dec 2008
- [**Bekenstein, 2003**] Jacob D. Bekenstein. Black holes and information theory. ArXiv:quant-ph/0311049v1 9 Nov 2003
- [**Bersanelli et al., 2002**] Bersanelli, D. Maino and Mennella. Anisotropies of the Cosmic Microwave Background. arXiv:astro-ph/0209215 v2 27 Sep 2002].
- [**Dunkley et al., 2008**] Dunkley et al. Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Likelihoods and Parameters from the WMAP data. ArXiv:astro-ph/0803.0586v1 5 Mar 2008
- [**Good, 2006**] Michael R.R. Good. Thermalizing the Vacuum. Available at: <http://www.unc.edu/~mgood/research/Unruh.pdf>. Русский перевод “Нагревая вакуум” доступен по ссылке: http://timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Thermalizing_the_vacuum.pdf
- [**Egan and Lineweaver, 2009**] Ch. Egan and Ch. Lineweaver. A larger estimate of the entropy of the universe. ArXiv:0909.3983v1 [astro-ph.CO] 22 Sep 2009. См. русский перевод “Увеличенная оценка энтропии Вселенной” по ссылке http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Universe_entropy.pdf
- [**Greene, 2004**] Brian R. Greene. The fabric of the cosmos: space, time and the texture of reality. Random House, Inc., New York, 2004. Русский перевод: Брайан Грин. Ткань космоса: Пространство, время и структура реальности. УРСС, М., 2006
- [**Gron and Braeck, 2009**] Gron O. and Braeck S. A cosmic solution to the twin paradox. arXiv:0909.5364v1 [gr-qc] 29 Sep 2009. См. русский перевод “Космическое решение парадокса близнецов” по ссылке www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Cosmic_twin_paradox.pdf
- [**Hagihara, 1931**] Y. Hagihara – Jap. J. Astr. Geoph., 1931, v. 86, p.67.
- [**Kaufman, 1977**] William Kaufman. The cosmic frontiers of General Relativity. Little Brown & Co (T), 1977. Русский перевод: Уильям Кауфман. Космические рубежи теории относительности. М., “Мир”, 1981. Главы из книги доступны по ссылке : <http://www.astronet.ru/db/msg/1174703/kaufman-toc.html>
- [**Komatsu et al., 2010**] Komatsu et al. Seven-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Interpretation. ArXiv: 1001.4538v2 [astro-ph.CO] 12 Feb 2010
- [**Lee, 2009**] Jae-Weon Lee. Are galaxies extending? arXiv:0805.2877v4 [astro-ph] 1 Oct 2009.
- [**Lopez-Corredoira, 2010**] Lopez-Corredoira M. Angular size test on the expansion of the Universe. arXiv:1002.0525v1 [astro-ph.CO] 2 Feb 2010. Реферат на русском языке “Угловой размер как тест расширения Вселенной” доступен по ссылке: www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Galaxies_angle_size.pdf
- [**Longair, 2008**] Malcolm S. Longair. Galaxy Formation. Second Edition. 2008. Springer-Verlag.
- [**Mazur and Mottola, 2002**] Pawel O. Mazur and Emil Mottola. Gravitational Condensate Stars: An Alternative to Black Holes. ArXiv:gr-qc/0109035v5 27 Feb 2002
- [**Myung et al., 2010**] Yun Soo Myung, Hyung Won Lee, and Yong-Wan Kim. Entropic force versus temperature force. arXiv:1006.1922v1 [hep-th] 9 Jun 2010. Русский перевод “Температурная сила взамен энтропийной силы” доступен по ссылке: http://timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Temperature_force.pdf

- [**Oppenheimer, H. Snyder, 1939**] J.R. Oppenheimer, H. Snyder. Phys. Rev. **56**, 455 (1939). Рус. пер.: Ю. Оппенгеймер, Г. Снайдер. О гравитационном безграничном сжатии. В сб. "Альберт Эйнштейн и теория гравитации", М.: "Мир", 1979, стр. 354 – 361.
- [**Porcelli and Scibona, 2010**] Fernando Porcelli and Giancarlo Scibona. On the Black Hole's Thermodynamics and the Entropic Origin of Gravity. Arxiv: 1011.0895. См. реферат на русском языке: Порцелли и Чибона. "О термодинамике черных дыр и энтропийном происхождении гравитации" по ссылке http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/1011_0895_Entropy_from_gravity.pdf
- [**Samtleben et al., 2008**] Dorothea Samtleben, Suzanne Staggs and Bruce Winstein. The Cosmic Microwave Background for Pedestrians: A Review for Particle and Nuclear Physicists, arXiv:0803.0834v1 [astro-ph] 6 Mar 2008
- [**Smolin, 1994**] Lee Smolin. The fate of black hole singularities and the parameters of the standard models of particle physics and cosmology. ArXiv:gr-qc/9404011v1 7 Apr 1994
- [**Spergel et al., 2003**] D. N. Spergel et al. First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters. ArXiv: astro-ph/0302209v3
- [**Steidel et al., 2004**] Steidel, C. C., Shapley, A. E., Pettini, M., Adelberger, K. L., Erb, D. K., Reddy, N. A., & Hunt, M. P. 2004, ApJ, 604, 534
- [**Verlinde, 2010**] Erik Verlinde. On the Origin of Gravity and the Laws of Newton. arXiv:1001.0785v1 [hep-th] 6 Jan 2010. Русский перевод "О природе тяготения и законов Ньютона" доступен по ссылке http://timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Gravity_and_entropy.pdf
- [**Wayne Hu and Dodelson, 2002**] Wayne Hu and Scott Dodelson. Cosmic Microwave Background Anisotropies. Annu. Rev. Astron. and Astrophys. 2002. ArXiv: 0110414v1
- [**Wayne Hu, 2008**] Wayne Hu. Lecture Notes on CMB Theory: From Nucleosynthesis to Recombination. arXiv:0802.3688v1 [astro-ph] 25 Feb 2008
- [**Weinberg, 1972**] Weinberg S., Gravitation and Cosmology: Principles and applications of the General Theory of Relativity, John Wiley and Sons, Inc., 1972. Русский перевод: Вейнберг С. Гравитация и космология: принципы и приложения общей теории относительности. М, "Мир", 1975.
- [**Анисович, 1996**] Анисович К.В. *Общая теория относительности с учетом принципа Маха*. Гравитация, т.2., вып. 1, 1996, М., с. 38-64
- [**Буссо, 2007**] Raphael Bousso. TASI Lectures on the Cosmological Constant. arXiv:0708.4231v2 [hep-th] 11 Sep 2007
- [**Вайнберг, 2000**] Вайнберг С. Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной. Москва. Издательство РХД. 2000.
- [**Вессон, 2003**] Wesson, P.S., Mod. Phys. Lett. A**19** (2004) 19952000, gr-qc/0309100).
- [**Владимиров и Турыгин, 1985**] Владимиров Ю.С., Турыгин А.Ю. *Теория прямого межчастичного взаимодействия*. Москва, Энергоатомиздат, 1985.
- [**Долби и Гулл, 2001**] С.Е. Dolby and S.F.Gull. *On radar time and the twin "paradox"*. Am. J. Phys. **69** (12), December, 2001.
- [**Зельдович, Новиков, 1975**] Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. *Строение и эволюция Вселенной*. Москва, Наука, 1975.
- [**Зурек, 2002**] Zurek H. Woitech. *Decoherence and the Transition from Quantum to Classical*. Los Alamos Science, Number 27, 2002 (текст доступен на сайте <http://quantum3000.narod.ru/>)
- [**Клапдор-Клайнротхаус, Цюбер, 2000**] H.V.Klapdor-Kleingrothaus, K.Zuber *Teilchenastrophysik*. B.G. Teubner GmbH, Stuttgart, 1997. Русский перевод: Клапдор-Клайнротхаус Г. В., Цюбер К. *Астрофизика элементарных частиц*. Москва, Редакция журнала "Успехи физических наук", 2000
- [**Козырев, 1991**] Козырев Н.А. *Избранные труды*. Ленинград, Издательство ЛГУ, 1991.
- [**Лаури, 1963**] Edward S. Lowry, *The Clock Paradox*. American Journal of Physics, vol. 31, p. 59, 1963
- [**Ландау и Лифшиц, 1967**] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Теория поля*. Москва, Наука, 1967.

[Ландау и Лифшиц, 1976] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Статистическая физика. Часть 1*. Москва, Наука, 1976.

[Левич, 1989] Левич А.П. Метаболическое время естественных систем. Академия наук СССР. Всесоюзный НИИ системных исследований. Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник 1988. Издательство “Наука”, М., 1989. Доступно по ссылке:

http://www.chronos.msu.ru/RREPORTS/levich_sistemnye.djvu

[Левич, 2003] Левич А.П. Метаболический и энтропийный подходы в моделировании времени. Доступно по ссылке:

http://www.chronos.msu.ru/RREPORTS/levich_metabolichesky/levich_metabolichesky.htm

[Левич, 2004] Левич А.П. Почему выполняются экстремальные принципы для энтропии и времени? В сб.: Пространство и время: физическое, психологическое, мифологическое. М.: КЦ “Акрополь”. 2004. С. 87-94. Доступно по ссылке:

http://www.chronos.msu.ru/RREPORTS/levich_pochemu.htm

[Линевивер и Дэвис, 2005] Ч. Линевивер и Т. Дэвис. Парадоксы Большого Взрыва. “В мире науки”, М., 2005. Доступно по ссылке: <http://www.sciam.ru/article/2629/>

[Логунов, 1988] Логунов А.А. *Новые представления о пространстве, времени и гравитации*. Международный ежегодник “Наука и человечество”, 1988.

[Менский, 1998] Менский М.Б. *Явление декогеренции и теория непрерывных квантовых измерений*. УФН, том 168, № 9, стр. 1017, 1998

[Менский, 2003] Менский М.Б. *Диссипация и декогеренция квантовых систем*. УФН, том 173, № 11, стр. 1999

[Новиков и Фролов, 2001] Новиков И.Д., Фролов В.П. Черные дыры во Вселенной. УФН, том 171, № 3. Март 2001 г. С. 307-324

[Новиков и Фролов, 1986] Новиков И.Д. и Фролов В.П. *Физика черных дыр*. Москва, Наука, 1986.

[Нэйв Р., 2003] Nave R, HyperPhysics, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>

[Палаш, 1999] Palash B. Pal. *Determination of cosmological parameters: an introduction for non-specialists*. arXiv:hep-ph/9906447 v1 22 Jun 1999 Доступно по ссылке

http://xxx.lanl.gov/PS_cache/hep-ph/pdf/9906/9906447.pdf

Русский перевод: Определение космологических параметров: введение для неспециалистов доступен по ссылке http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Palash.pdf

[Паули, 1947] Паули В. *Теория относительности*. Москва-Ленинград, ОГИЗ, 1947.

[Пригожин, Стенгерс, 1994] И.Пригожин, И.Стенгерс. *Время, хаос, квант*. Москва, Прогресс, 1994.

[Перлмутер, 1999] Saul Perlmutter, Lawrence Berkeley Laboratory 50-232, University of California. *High Redshift Supernova Search, Supernova Cosmology Project* Доступно по ссылке <http://panisse.lbl.gov/>

[Постнов] Постнов К.А. Лекции по общей астрофизике для физиков //11.4 Реликтовое излучение и эпоха рекомбинации. Доступно по ссылке:

<http://www.astronet.ru:8101/db/msg/1170612/node60.html>

[Рисс, 2004] Riess, A.G., et al., 2004a, ApJ, 600, L163

[Рубаков, 2007] Рубаков В.А. Темная материя и темная энергия во Вселенной.

<http://elementy.ru/lib/25560/25567>

[Сажин, 2002] Сажин М.В. *Современная космология в популярном изложении*. Москва, Издательство “Едиториал УРСС”, 2002.

[Сажин] Сажин М.В., *Теория относительности для астрономов*. ГАИШ, Москва. Доступно по ссылке <http://www.astronet.ru:8101/db/msg/1170927>

- [Толмен, 1934] Richard C. Tolman. *Relativity, Thermodynamics And Cosmology*. Oxford, Clarendon Press, 1934. Русский перевод: Толмен Р. *Относительность, термодинамика и космология*. Москва, Наука, 1974.
- [Тэйлор и Уилер, 1971] Э. Ф. Тейлор, Дж. А. Уилер, *Физика пространства-времени*. 2-е изд., Москва, Мир, 1971
- [Уилер, Фейнман, 1945] Wheeler J.A., Feynman R.P. *Interaction with the Absorber as the Mechanism of Radiation*, *Reviews of Modern Physics*, **17**, 156, (1945)
- [Уилер, Фейнман, 1949] Wheeler J.A., Feynman R.P. *Classical Electrodynamics in Terms of Direct Interparticle Action*, *Reviews of Modern Physics*, **vol. 21**, numb. 3, p. 425-433 (1949)
- [Фейнман и др., 1963] Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. *Фейнмановские лекции по физике*. Москва, Мир, 1978
- [Фридман, 1922] Фридман А.А. *О кривизне пространства*. В сб. "Альберт Эйнштейн и теория гравитации", Москва, Мир, 1979
- [фон Нейнман, 1932] фон Нейнман И. *Математические основы квантовой механики*. Москва, Наука, 1964.
- [Хайтун, 1996] Хайтун С.Д. *Механика и необратимость*. Москва, Янус, 1996.
- [Хокинг, 1990] Хокинг С. *Краткая история времени. От большого взрыва до черных дыр*. Москва, Мир, 1990.
- [Чернин, 2008]. Чернин А.Д. *Темная энергия и всемирная антигравитация*, УФН, том, 178, № 3, март 2008 г. с. 267-299.
- [Шаров, Новиков, 1989] Шаров А.С., Новиков И.Д. *Человек, открывший взрыв Вселенной. Жизнь и труд Эдвина Хаббла*. Москва, Наука, 1989.
- [Шипов, 1993] Шипов Г.И. *Теория физического вакуума*. Москва, НТ-Центр, 1993.
- [Шульман, 2003] Шульман М.Х. *Теория шаровой расширяющейся Вселенной*. Москва, Едиториал УРСС, 2003.
- [Шульман, 2004] Шульман М.Х. *Вариации на темы квантовой теории*. Москва, Едиториал УРСС, 2004.
- [Шульман, 2005] Шульман М.Х. *Логика и парадоксы времени*. Доступно по адресу http://www.chronos.msu.ru/RREPORTS/shulman_logika.pdf
- [Шульман, 2007а] Шульман М.Х. Коллапс обычный и необычный. 2007. Доступно по ссылке: http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_time/Collapse.pdf
- [Шульман, 2007б] Шульман М.Х. Космология: новый подход. Доступно по ссылке: http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_time/New_approach.pdf
- [Шульман, 2007в] Шульман М.Х. О реальности существования выделенной системы отсчета. 2007. Доступно по ссылке: www.timeorigin21.narod.ru/rus_time/selected_frame_rus.pdf
- [Шульман, 2007г] Шульман М.Х. О проблеме пониженной светимости сверхновых. 2007. Доступно по ссылке: http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_time/svetimost.pdf
- [Шульман и Рэффел, 2008] Шульман М.Х., Рэффел Г. О феномене старейших реликтовых фотонов. 2008. Доступно по ссылке: www.timeorigin21.narod.ru/rus_time/Oldest_photons_rus.pdf
- [Шульман, 2009а] Шульман М.Х. Время и космологический метаболизм. Доступно по ссылке: http://www.timeorigin21.narod.ru/Time_and_metabolism_rus.pdf
- [Шульман, 2009б] Шульман М.Х. Время и черные дыры. Доступно по ссылке: http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_time/Time_and_BH_rus.pdf
- [Шульман, 2009в] Шульман М.Х. Время, энтропия и Вселенная. Доступно по ссылке: http://www.timeorigin21.narod.ru/Time_and_entropy_rus.pdf
- [Шульман, 2009г] Шульман М.Х. Парадокс близнецов и абсолютная система отсчета. Доступно по ссылке: http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_time/Twins_and_abs_frame_rus.pdf

[Шульман и Рэффел, 2010] Шульман М.Х., Рэффел Г. Об эволюции угловых размеров галактик. Доступно по ссылке: http://timeorigin21.narod.ru/rus_time/angle_size_evolution_rus.pdf

[Рэффел и Шульман, 2010] Рэффел Г., Шульман М.Х. О распределении числа галактик в зависимости от величины красного смещения. Доступно по ссылке: http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_time/Galaxy_distr_rus.pdf

[Шульман, 2010а] Шульман М.Х. Расширение Вселенной и главный пик спектра фонового космического излучения. Доступно по ссылке: http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_time/Main_peak_rus.pdf

[Шульман, 2010б] Шульман М.Х. Энтропия источника поля тяготения. Доступно по ссылке: http://timeorigin21.narod.ru/rus_time/Force_and_entropy_rus.pdf

[Эйнштейн, 1916] Эйнштейн А. *Основы общей теории относительности*. В сб. “Альберт Эйнштейн и теория гравитации”, Москва, Мир, 1979

[Эйнштейн, 1917] Эйнштейн А. *Вопросы космологии и общая теория относительности*. В сб. “Альберт Эйнштейн и теория гравитации”, Москва, Мир, 1979.

[Эйнштейн, 1953] Эйнштейн А. *Сущность теории относительности*. Москва, ИЛ, 1955.

[Ям, 2004] Ям Филлип. *Повсеместный Эйнштейн*. “В мире науки”, № 12, 2004, с.30-35