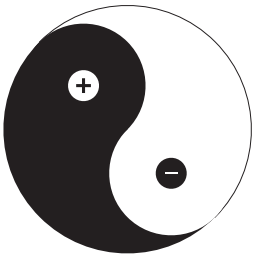
Челябинский государственный университет

В. А. Клименко, А. В. Клименко

# ДВУЗНАКОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ




Челябинск
Издательство Челябинского государственного университета
2017

УДК 524.8
ББК 22.313.7
К492

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Челябинского государственного университета

**Клименко, В. А.**
К492 Двузнаковая гравитация / В. А. Клименко, А. В. Клименко. Челябинск : Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2017. 289 с.
ISBN 978-5-7271-1414-8

Даётся описание двузнаковой гравитации, согласно которой Вселенная не только электро-, но и гравитационно-нейтральна. В этой теории предполагается, что главной компонентой космической среды является физический вакуум. Частицы и античастицы рассматриваются как его возбуждённые состояния. Считается, что они отличаются знаком энергии и между ними существует антитяготение. Учёт антитяготения между частицами и античастицами приводит к кардинальному изменению существующих представлений о гравитации и её проблемах. Показано, что в рамках двузнаковой гравитации они решаются значительно проще и убедительнее, чем в общей теории относительности.

Издание рассчитано на научных работников, студентов и аспирантов физико-математических факультетов, желающих ознакомиться с фундаментальными проблемами теории гравитации и космологии.

ББК 524.8(075)

ISBN 978-5-7271-1414-8 © Клименко В. А., Клименко А. В., 2017

# ОГЛАВЛЕНИЕ

**ПРЕДИСЛОВИЕ** . . . . . 7

**ЧАСТЬ I. КАЧЕСТВЕННОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ДВУЗНАКОВОЙ ГРАВИТАЦИИ**

**Глава 1. Частицы и античастицы во Вселенной** . . . . . 21

1.1. Частицы и античастицы . . . . . 21
1.2. Идея «симметричной» Вселенной . . . . . 22
1.3. Барионная асимметрия . . . . . 23
1.4. «Лишние» барионы . . . . . 24
1.5. «Второстепенные факты» . . . . . 25

**Глава 2. Гравитация, тяготение и антитяготение** . . . . . 27

2.1. Ньютоновская гравитация . . . . . 27
2.2. Эйнштейновская гравитация . . . . . 28
2.3. Проблема барионной асимметрии . . . . . 30
2.4. Проблема источников гравитации . . . . . 32
2.5. Двузнаковая гравитация . . . . . 33
2.6. Двузнаковость энергии . . . . . 34
2.7. Двузнаковая гравитация и ОТО . . . . . 36
2.8. Проблема сингулярностей в гравитации . . . . . 39
2.9. Гравидинамика . . . . . 39

**Глава 3. Геометрические и физические свойства Вакуума** . . . . . 42

3.1. Вакуум-пространство-время . . . . . 42
3.2. Геометрические свойства однородного Вакуума . . . . . 43
3.3. Физические свойства Вакуума . . . . . 46
3.4. Тёмная энергия . . . . . 47
3.5. Гравитационно-нейтральная вакуумная материя . . . . . 48
3.6. О проблеме космологической постоянной . . . . . 49
3.7. Проявления Вакуума . . . . . 50

**Глава 4. Динамика Вселенной** . . . . . 51

4.1. Однородность и изотропность Вселенной . . . . . 51
4.2. Хаббловское расширение Вселенной . . . . . 52
4.3. Космологические уравнения Фридмана . . . . . 55
4.4. Обычные формы материи . . . . . 56
4.5. Эйнштейновские силы отталкивания . . . . . 58
4.6. Стандартная космологическая модель . . . . . 60
4.7. Модель гравитационно-нейтральной Вселенной . . . . . 63
4.8. Динамика Вселенной согласно S-модели . . . . . 64
4.9. Объяснение важных для космологии наблюдений . . . . . 66
4.10. S- и ΛCDM-модели. Сравнение . . . . . 69

**Глава 5. Миры и антимиры** . . . . . 72
5.1. Общие замечания . . . . . 72
5.2. Распад Вселенной на миры и антимиры . . . . . 74

**Глава 6. Фотоны и антифотоны** . . . . . 79
6.1. Антифотоны . . . . . 79
6.2. Антифотоны в гравитационном поле Земли . . . . . 80
6.3. Антифотоны в сильном гравитационном поле . . . . . 80
6.4. О расщеплении спектра аннигиляционных γ-квантов . . . . . 81
6.5. Релятивистские объекты на фоне гравитационных линз . . . . . 82
6.6. Гравитационные линзы на реликтовом фоне . . . . . 82
6.7. Антифотоны из чёрных дыр . . . . . 83
6.8. Фотоны и антифотоны. Ожидания . . . . . 84

**Глава 7. Двузнаковая гравитация. Идеи и результаты** . . . . . 85

**ЧАСТЬ II. ГРАВИТАЦИОННО-НЕЙТРАЛЬНАЯ ВСЕЛЕННАЯ**

**Глава 8. Состав Вселенной и её динамика** . . . . . 97
8.1. Представления прошлого века . . . . . 97
8.2. Современные представления . . . . . 100
8.3. Космическая среда гравитационно-нейтральной Вселенной . . . . . 103

**Глава 9. Космологические модели Вселенной** . . . . . 106

**Глава 10. Уравнения Эйнштейна** . . . . . 108

**Глава 11. Геометрия однородной изотропной Вселенной** . . . . . 113
11.1. Однородные изотропные гиперповерхности . . . . . 113
11.2. Сферическое пространство . . . . . 113
11.3. Пространство отрицательной кривизны . . . . . 116
11.4. Плоское (евклидово) пространство . . . . . 117

**Глава 12. Космологические уравнения Фридмана** . . . . . 118

**Глава 13. Уравнения Эйнштейна с Λ-членом** . . . . . 123

**Глава 14. Стандартная модель Вселенной (ΛCDM-модель)** . . . . . 126
14.1. Исходные предположения . . . . . 126
14.2. Уравнения стандартной модели . . . . . 127
14.3. Параметры ΛCDM-модели . . . . . 128
14.4. Качественный анализ эволюции Вселенной . . . . . 129
14.5. Эпохи эволюции Вселенной в ΛCDM-модели . . . . . 131

**Глава 15. Проблемы ΛCDM-модели** . . . . . 134

**Глава 16. Уравнения двузнаковой гравитации** . . . . . 136
16.1. Двузнаковость энергии. Частицы и античастицы . . . . . 136
16.2. Уравнения двузнаковй гравитации . . . . . 138
16.3. Закон сохранения энергии-импульса . . . . . 141

16.4. Ньютоновское приближение в двузнаковой гравитации . . . . . 142
16.5. Метрика Шварцшильда и метрика К2 . . . . . 143
16.6. Геодезические для частиц и античастиц . . . . . 148
16.7. Слабое гравитационное поле . . . . . 149
16.8. Центрально-симметричное гравитационное поле . . . . . 150
16.9. Отрицательные массы . . . . . 151
16.10. Тёмная энергия и двузнаковая гравитация. . . . . 152

**Глава 17. Модель гравитационно-нейтральной Вселенной** . . . . . .153

17.1. Предположения . . . . . 153
17.2. Исходные уравнения . . . . . 153
17.3. Динамика гравитационно-нейтральной Вселенной . . . . . 154

**Глава 18. Интерпретация наблюдений в космологии** . . . . . .157

18.1. Используемые космологические модели . . . . . 157
18.2. Возраст Вселенной. . . . . 157
18.3. Зависимость «звёздная величина – красное смещение» . . . . . 158
18.4. Анизотропия реликтового излучения . . . . . 164
18.5. Угловые размеры удалённых объектов . . . . . 167
18.6. Первичный нуклеосинтез . . . . . 169

## ЧАСТЬ III. ВАКУУМ, ЧАСТИЦЫ, АНТИЧАСТИЦЫ И ГРАВИТАЦИЯ

**Глава 19. Геометрия однородного изотропного Вакуума** . . . . . 175

19.1. Уравнение для гравитационного поля в Вакууме . . . . . 175
19.2. Уравнения Фридмана для Вакуума . . . . . 177
19.3. Плоские трёхмерные пространства . . . . . 179
19.4. Искривлённые трёхмерные пространства . . . . . 180
19.5. Обсуждение полученных решений. . . . . 182

**Глава 20. Вакуумные материи** . . . . . .185

20.1. Искривлённость пространства-времени и вакуумные материи . . 185
20.2. Тёмная энергия . . . . . 187
20.3. Гравитационно-нейтральная вакуумная материя . . . . . 189
20.4. Проблемные вопросы . . . . . 192

**Глава 21. Анизотропия параметров частиц и античастиц** . . . . . 200

21.1. Исходные предположения . . . . . 200
21.2. Космическая среда современной Вселенной . . . . . 201
21.3. Привилегированные системы отсчёта . . . . . 202
21.4. Относительность и привилегированные системы отсчёта . . . . . 203
21.5. Анизотропия вакуума и реликтового излучения. . . . . 204
21.6. Анизотропия параметров частиц и античастиц . . . . . 205

**Глава 22. О природе сил инерции**. . . . . .209

22.1. Основополагающая идея . . . . . 209
22.2. Эйнштейн о природе сил инерции . . . . . 210
22.3. Материальная природа сил инерции . . . . . 211

22.4. Принцип эквивалентности гравитации и инерции . . . . . 213
22.5. Мысленные эксперименты Эйнштейна в лифте . . . . . 214
22.6. Реальные и фиктивные силы инерции . . . . . 217
22.7. Мысленные эксперименты и реальность . . . . . 219
22.8. «Одинаковые условия» . . . . . 219
22.9. Вакуум-пространство-время . . . . . 221

**Глава 23. Фотоны и антифотоны в гравитационном поле . . . . . 223**

23.1. Гравитационные заряды фотонов и антифотонов . . . . . 223
23.2. Излучение в постоянном гравитационном поле . . . . . 226
23.3. Расщепление изображений релятивистских объектов . . . . . 228
23.4. Искажение наблюдаемых форм гравитационных линз . . . . . 228
23.5. Анизотропия поляризации реликтового излучения . . . . . 229
23.6. Гамма-всплески. Антитяготение . . . . . 229

**Глава 24. Гравитационное расщепление спектральных линий . . . . . 235**

24.1. Наблюдаемое явление . . . . . 235
24.2. Существующее объяснение расщепления . . . . . 235
24.3. Альтернативное объяснение расщепления . . . . . 238
24.4. Обсуждение результатов . . . . . 244

**Глава 25. Миры и антимиры . . . . . 246**

25.1. О механизме зарождения структур во Вселенной . . . . . 246
25.2. О распаде Вселенной на миры и антимиры . . . . . 248
25.3. Уравнения, описывающие малые возмущения . . . . . 249
25.4. Рост возмущений в ранней Вселенной . . . . . 253
25.5. Обсуждение результатов . . . . . 256

**Глава 26. Гравидинамика . . . . . 260**

26.1. Основополагающие идеи гравидинамики . . . . . 260
26.2. Гравитационные заряды и принцип эквивалентности . . . . . 261
26.3. Состав космической среды . . . . . 261
26.4. Уравнения гравидинамики . . . . . 262
26.5. Слабые гравитационные поля . . . . . 263
26.6. Динамика однородной изотропной Вселенной . . . . . 264

**Глава 27. Вакуум и гравитация . . . . . 267**

27.1. Поляризация вакуума — альтернатива тёмной материи . . . . . 267
27.2. Тёмная материя в наблюдениях . . . . . 271
27.3. Поле точечной массы в вакууме . . . . . 273
27.4. Поле однородного шара . . . . . 274
27.5. Поляризация вакуума и наблюдения . . . . . 279

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . . 283**

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК . . . . . 284**

# ПРЕДИСЛОВИЕ

*Это, конечно, сумасшедшая теория. Однако она мне кажется недостаточно сумасшедшей, чтобы быть правильной новой теорией.*

**Н. Бор**

В общей теории относительности (ОТО) гравитация не различает частицы и античастицы. Возможно, что в реальности это не так и между частицами и античастицами существует не тяготение, а антитяготение. В книге приведены теоретические соображения, а также наблюдательные данные в защиту этой гипотезы. Излагается основанная на этой гипотезе теория гравитации, названная авторами двузнаковой гравитацией. Эта теория использована для объяснения астрономических наблюдений, а также переосмысления некоторых фундаментальных положений современной физики. Обсуждается возможность обнаружения эффектов, предсказываемых двузнаковой гравитацией.

**Содержание книги**. В первой части на качественном уровне изложены идеи, лежащие в основе двузнаковой гравитации. Рассмотрена связь этой теории с общей теорией относительности. В рамках двузнаковой гравитации обсуждаются актуальные проблемы современной физики: барионная асимметрия окружающего нас мира; роль физического вакуума в гравитации; состав космической среды; космологические силы отталкивания, а также ряд других.

Во второй части книги записаны уравнения общей теории относительности и двузнаковой гравитации. Они использованы для интерпретации наблюдаемой динамики Вселенной. Дано описание двух её космологических моделей. В основе первой из них ($\Lambda$CDM-модели) лежит ОТО, а второй (S-модели) – двузнаковая гравитация. Показано, что объяснение ключевых для космологии наблюдений в рамках S-модели значительно проще и убедительнее, чем в рамках $\Lambda$CDM-модели.

В третьей части книги показано, что ОТО является ограниченной теорией, и связано это с неправильным описанием в этой теории гравитационных свойств вакуума и взаимодействия частиц и античастиц.

Показано, что с учётом идеи о различии в гравитации частиц и античастиц решения фундаментальных проблем физической теории (барионной асимметрии, физического вакуума, состава космической среды, природы инерции и некоторых других) оказываются совершенно иными, чем в рамках ОТО. Становится понятным, почему предлагаемые в рамках общей теории относи-

тельности решения этих проблем являются громоздкими и неубедительными и почему они имеют ясный и простой смысл в рамках двузнаковой гравитации.

**Описание идей и результатов**. Предположение о том, что гравитация различает частицы и античастицы, приводит к необходимости изменения некоторых фундаментальных положений современной физической теории. Переосмыслению подлежат, в частности, существующие представления о пространстве и времени, о составе и динамике Вселенной, о барионной асимметрии окружающего мира и о механизмах зарождения структур во Вселенной, о релятивистских стадиях эволюции космической среды.

Главное отличие двузнаковой гравитации от общей теории относительности заключается в описании источника гравитационного поля. Им является тензор энергии-импульса материи. ОТО не различает частицы и античастицы, и это выражается в том, что их вклады в тензор энергии-импульса суммируются. В двузнаковой гравитации источником гравитационного поля также является тензор энергии-импульса. Его отличие от тензора энергии-импульса ОТО лишь в одном: вклады в этот тензор частиц и античастиц не суммируются, а вычитаются. Считается, что основополагающим элементом космической среды является физический вакуум, а частицы и античастицы – его возбуждёнными состояниями. Частицы – состояниями с положительной энергией, а античастицы – состояниями с отрицательной энергией. Гравитационные заряды частиц и античастиц определяются их энергией. В отличие от ОТО, где все гравитационные заряды одного знака и притягиваются, в двузнаковой гравитации частицы и античастицы имеют гравитационные заряды противоположного знака и отталкиваются.

В предельном случае, когда видимая (барионная) материя состоит лишь из частиц (в мирах) или античастиц (в антимирах) и когда эффекты гравитационной поляризации вакуума несущественны, двузнаковая гравитация переходит в ОТО.

В двузнаковой гравитации, как и в ОТО, ковариантная дивергенция от тензора энергии-импульса равна нулю. Имеет место закон сохранения энергии (гравитационного заряда). Необходимо лишь иметь в виду, что в двузнаковой гравитации энергии частиц и античастиц отличаются знаками. Показано, что в двузнаковой гравитации может быть введён тензор энергии-импульса гравитационного поля, и оно является проявлением деформации вакуума.

В двузнаковой гравитации считается, что Вселенная симметрична по частицам и античастицам, её полный гравитационный заряд равен нулю, и она не только электронейтральна, но и гравитационно-нейтральна. В этой теории полная энергия Вселенной равна нулю и сохраняется. Она всегда поровну распределена между частицами и античастицами. Их полные гравитационные заряды (энергии) равны друг другу по величине, но имеют противоположные знаки. Как и в случае электрических зарядов, может происходить их рождение

и уничтожение. Спектр значений гравитационных зарядов может быть как непрерывным, так и дискретным.

Для того чтобы в двузнаковой гравитации закон сохранения гравитационного заряда (энергии-импульса) выполнялся не только для Вселенной в целом, но и для любых элементарных процессов, античастицы, следуя Фейнману, рассматриваются как частицы, но с отрицательной энергией и движущиеся во времени вспять. Эта идея Фейнмана является важным аргументом в защиту «законности» двузнаковой гравитации.

Двузнаковая гравитация, как и ОТО, является макроскопической теорией. В этих теориях описание гравитационного поля и его источников проводится в рамках механики сплошных сред.

Чтобы согласовать идею о различии частиц и античастиц в гравитации с существующими представлениями о том, что все компоненты космической среды являются источниками гравитационного поля, высказывается следующая гипотеза: у любой частицы, в том числе и у фотона, существует античастица.

В двузнаковой гравитации, как и в ОТО, гравитация является следствием искривлённости пространства-времени. Считается, что пространство-время является римановым многообразием. Его локальные геометрические свойства определяются симметричным метрическим тензором. Кратчайшими линиями в искривлённом пространстве-времени являются геодезические. Тела в пространстве-времени движутся по ним. При одинаковых начальных условиях они попадают на одну и ту же геодезическую линию и движутся одинаково.

В двузнаковой гравитации частицы и античастицы не только по-разному искривляют пространство-время, но и по-иному воспринимают его. «Представления» частиц и античастиц о гравитационном поле не совпадают. То, что для частиц является полем притяжения, для античастиц является полем отталкивания, и наоборот. Например, описание гравитационного поля точечной частицы в представлении одноимённых с ней гравитационных зарядов даётся метрикой Шварцшильда. В то же время в представлении разноимённых с ней гравитационных зарядов метрика этого поля отличается от метрики Шварцшильда знаком гравитационного радиуса $r_g$ (см. п. 16.4).

В двузнаковой гравитации античастицы, как и частицы, движутся в искривлённом пространстве-времени по геодезическим, но, в отличие от ОТО, геодезические для частиц и античастиц не совпадают.

В ОТО при наличии материи всегда существует гравитационное поле. В двузнаковой гравитации материя, содержащая равные количества равномерно перемешанных вещества и антивещества, макроскопического гравитационного поля не создаёт.

Согласно двузнаковой гравитации, на космологических расстояниях имеет место равновесие сил притяжения и отталкивания. На этих масштабах трёхмерное пространство является плоским, и Вселенная расширяется равномерно.

Космологические уравнения Фридмана, описывающие это расширение, не содержат свободных параметров и имеют предельно простой вид. В рамках этих уравнений, без каких-либо дополнительных предположений, объясняются надёжно установленные наблюдательные данные, для которых существенны космологические эффекты (см. гл. 17–18).

Интерпретация этих наблюдательных данных в рамках ОТО значительно сложнее. Она содержит ряд сомнительных гипотез. Не учитывается различие частиц и античастиц. Вместо гравитационно-нейтрального вакуума используется гравитационно-заряженная тёмная энергия. Для объяснения наблюдаемой динамики Вселенной предполагается «плоскостность» пространства. Для теории, в которой полная энергия Вселенной отлична от нуля, это предположение не является корректным. Считается, что в современной Вселенной в пять-шесть раз больше невидимой тёмной материи, чем видимой барионной материи. Тёмная энергия и тёмная материя являются гипотетическими сущностями.

Современная космологическая модель Вселенной, основанная на общей теории относительности ($\Lambda$CDM-модель), является эмпирической. Она содержит пять свободных параметров, четыре из которых непосредственно не измеряются и являются подгоночными.

В ОТО существует проблема физического вакуума. Если вклады виртуальных частиц и античастиц в плотность энергии физического вакуума брать с одинаковыми знаками, то она оказывается несоизмеримо больше, чем плотность энергии обычных форм материи. В общей теории относительности, чтобы исключить катастрофическое противоречие теории и наблюдений, не объясняя причины, вклад физического вакуума в создание гравитационного поля не учитывается. При этом естественно возникает вопрос: почему физический вакуум, имеющий огромную плотность энергии, не проявляется, а другие формы материи, имеющие несравненно меньшую плотность энергии, проявляются? Это нелогично для теории, утверждающей, что любые формы материи являются равноправными источниками гравитационного поля и их вклады в его создание суммируются.

В двузнаковой гравитации проблема физического вакуума естественным образом решается. Учитывается, что физический вакуум состоит из виртуальных частиц и античастиц, а их вклады в тензор энергии-импульса берутся с противоположными знаками. Поскольку вакуум является симметричным по виртуальным частицам и античастицам, то их вклады в искривление пространства-времени взаимно компенсируются. В отличие от общей теории относительности в двузнаковой гравитации предположение о том, что главной компонентой космической среды является физический вакуум, не приводит к внутренним противоречиям теории. В этой теории пространство-время и физический вакуум – неразрывно связанные сущности. Вакуум является

материальной, а пространство-время геометрической компонентами единого физического объекта «вакуум–пространство–время». В двузнаковой гравитации он рассматривается как безграничная идеальная сплошная электро- и гравитационно-нейтральная среда, обладающая плотностью энергии, давлением, электрической и гравитационной поляризациями. В этой теории левая геометрическая часть уравнения гравитационного поля рассматривается как описывающая тензор энергии-импульса этого поля (см. п. 16.3). Микроскопическая теория вакуума-пространства-времени в книге не обсуждается.

В рамках двузнаковой гравитации можно пояснить смысл Λ-члена уравнений Эйнштейна как связанного с нарушением симметрии физического вакуума по частицам и античастицам. В этой теории предположение о том, что значение космологической постоянной $\Lambda \simeq 10^{-56}$ см$^{-2}$, как это считается в современной космологии, означает существование различия концентраций виртуальных частиц и античастиц на уровне меньшем, чем $10^{-31}$. Показано, что предполагать даже столь малые нарушения гравитационной нейтральности вакуума нет необходимости. Теория хорошо объясняет наблюдаемую динамику Вселенной и без учёта Λ-члена (тёмной энергии). В двузнаковой гравитации предполагать наличие гравитационного заряда у Вселенной столь же неестественно, как и наличие у неё электрического заряда, отличного от нуля.

Уравнение состояния гравитационно-нейтрального вакуума таково, что он, как и реликтовое излучение, в любом месте Вселенной, выделяет привилегированную локально-инерциальную систему отсчёта. Лишь в этой системе отсчёта вакуум не только однороден, но и изотропен.

С учётом гипотезы о зависимости параметров частиц и античастиц от скорости их движения в вакууме показано, что такие величины, как масса покоя и время жизни частиц и античастиц, считающиеся в современной физике универсальными константами во всех инерциальных системах отсчёта, в реальности таковыми не являются. Такой смысл они имеют лишь в привилегированных локально инерциальных системах отсчёта, связанных с вакуумом.

В инерциальных системах отсчёта, движущихся относительно вакуума, должна наблюдаться анизотропия параметров частиц и античастиц. Теория предсказывает, что, вследствие движения Солнечной системы в вакууме со скоростью приблизительно 390 км/с в направлении созвездия Девы, должна наблюдаться дипольная компонента анизотропии массы и времени жизни релятивистских частиц и античастиц на уровне 0,13 % от их средних значений. Считаем, что экспериментальное доказательство существования этой анизотропии для массовых частиц/античастиц является одной из важнейших задач современной физики. Существование дипольной компоненты анизотропии температуры реликтового излучения, приблизительно равной 0,13 %, является давно и надёжно установленным фактом (Нобелевская премия по физике, 2006 г.).

Согласно ОТО гравитационные поля можно создать переходом в неинерциальные системы отсчёта. Считается, что такие поля, вообще говоря, отличаются от полей, источником которых является материя. Первые из них могут быть уничтожены переходом в инерциальную систему отсчёта, тогда как для вторых такое уничтожение невозможно. Вследствие присутствия такого различия в поведении этих полей, часто о гравитационных полях, связанных с неинерциальностью систем отсчёта, говорят как о фиктивных, а о порождаемых материей – как истинных. В существовании различия в поведении этих типов гравитационных полей видится существенный теоретико-познавательный недостаток общей теории относительности. Полагаем, что он связан с неточностью интерпретации природы сил инерции, понимаемых как искусственно порождаемых неинерциальностью систем отсчёта, а не связанных с взаимодействием тел, как это имеет место для «истинных» гравитационных полей. Рассматривая силы инерции, действующие на тело, в ОТО не указывают второе тело, участвующее во взаимодействии и являющееся причиной возникновения сил инерции.

При создании общей теории относительности Эйнштейн, следуя Маху, предполагал, что наличие сил инерции связано с влиянием на любое тело всех отдалённых масс Вселенной. Эта идея о природе сил инерции (принцип Маха) не является удовлетворительной по следующей причине. Эти силы, действующие внутри некоторой системы, могут быть изменены за счёт внутренних процессов. Любое тело в этой системе можно заставить двигаться и вращаться быстрее или медленнее. При этом, в соответствии с происходящими изменениями параметров движения, будут меняться и силы инерции, действующие на это тело. Очевидно, что эти изменения, если оставаться на позиции конечности максимальной скорости распространения взаимодействий, вовсе не связаны с «отдалёнными массами», как это утверждается в принципе Маха, содержащем в неявной форме предположение о бесконечной скорости распространения взаимодействия. Это противоречит ОТО, поэтому в этой теории и нет принципа Маха.

Согласно двузнаковой гравитации действие сил инерции на тело связано не с удалёнными телами, а с тем, во что оно погружено. Тело находится не в пустоте, а в вакууме, который является средой, обладающей определёнными физическими свойствами. Эта среда влияет на всё, что в неё погружено. Вместе с тем это взаимодействие определяется характером движения по отношению к этой среде погружённых в неё тел. В такой трактовке силы инерции это не фикция, а то, что связано с реальным взаимодействием тел с вакуумом. Тела, движущиеся относительно вакуума неравномерно и непрямолинейно, испытывают с его стороны реакцию на изменение их скорости. Эта реакция и является тем, что определяется как силы инерции. В двузнаковой гравитации и инерционные и гравитационные поля связаны с изменениями параметров физического вакуума.

Согласно двузнаковой гравитации вакуум различает частицы и античастицы и его влияние на них не является одинаковым. Показано, что нет оснований считать, что влияние сил гравитации и инерции на вещество и антивещество при одинаковых условиях, например в мысленных экспериментах Эйнштейна в лифте, будет одинаковым (см. гл. 22).

В книге подробно обсуждается вариант двузнаковой гравитации, согласно которому все частицы являются источниками гравитационного поля. В этом варианте должны существовать антифотоны. Они отличаются от фотонов знаком гравитационного заряда и, возможно, ещё и спиральностью (см. гл. 23). Идея об антифотонах кажется фантастической. В то же время не видно теоретических запретов на их существование. Обычно фотоны и антифотоны присутствуют в излучении в равных количествах, и оно не является поляризованным. Например, таковым является чёрнотельное излучение. Существование в нём равного количества фотонов левой и правой спиральностей отражено в формуле, определяющей планковское распределение фотонов по энергиям, наличием в ней множителя, равного двойке. В электродинамике нет оснований рассматривать антифотон как некоторую новую неизвестную ранее частицу. В то же время отметим, что существование и различие фотонов двух поляризаций в этой теории учитывается. В двузнаковой гравитации существует вопрос: одинаково ли действует гравитационное поле на фотоны левой и правой спиральностей? Ответ на него можно получить из наблюдений. Считаем, что проведение соответствующих исследований является важной задачей современной физики.

Различие поведения фотонов и антифотонов в слабых гравитационных полях Земли и Солнца является столь малым, что могло быть не замечено наблюдателями. Оно может быть выявлено лишь в специальных исследованиях, которые не проводились, поскольку не существовало и самой идеи об антифотонах.

Явное различие поведения фотонов и антифотонов должно явно проявляться в сильных гравитационных полях, например, в окрестности нейтронных звёзд, квазаров и других релятивистских объектов. В книге приведено описание нескольких случаев, в которых различие в поведении фотонов и антифотонов в гравитационных полях, как мы полагаем, чётко проявляется.

Идея об антифотонах использована нами для объяснения природы гамма-всплесков, которые наблюдаются почти ежедневно. Их продолжительность – доли секунды – десятки секунд. За такие короткие, по астрономическим меркам, времена в гамма-всплесках в виде $\gamma$-квантов, имеющих энергии десятки и сотни килоэлектронвольт, а иногда и значительно больше, выделяются энергии порядка полной энергии Солнца. В рамках существующих теорий не удаётся убедительно показать, как можно за доли секунды превратить

массу порядка солнечной в $\gamma$-кванты и изотропно излучить их в окружающее пространство. В рамках двузнаковой гравитации этому явлению дано простое и естественное объяснение (см. гл. 23).

Предполагается, что гамма-всплески связаны с падением на объекты, определяемые в настоящее время как чёрные дыры, компактных космических тел, имеющих массы, соизмеримые с массой Солнца. Этими телами могут быть белые карлики и нейтронные звёзды. При падении на массивные чёрные дыры, масса которых значительно больше солнечной, эти звёзды разгоняются до энергий, соизмеримых с энергией их покоя. В чёрной дыре кинетическая энергия падающих звёзд идёт на рождение частиц и античастиц, которые в экстремальных условиях этого релятивистского объекта достаточно быстро превращаются в излучение (фотоны, антифотоны, нейтрино и антинейтрино). Согласно ОТО нет способа вывести их из чёрной дыры в окружающее пространство. Принципиально по-другому видится поведение античастиц, рождающихся в чёрной дыре, в рамках двузнаковой гравитации. Согласно этой теории для античастиц чёрная дыра является мощнейшим центром антитяготения. За счёт антитяготения из чёрной дыры вылетают все образующиеся в ней античастицы (в рассматриваемом случае антифотоны и антинейтрино). Согласно двузнаковой гравитации одновременно с гамма-всплесками (точнее с антигамма-всплесками) должны наблюдаться также и всплески антинейтринного излучения, соизмеримые с ними по мощности.

В гл. 24 показано, что наблюдаемое расщепление эмиссионных спектральных линий источника SS 433, возможно, также является явным указанием на существование антифотонов.

Если существование антифотонов будет доказано, то они могут стать эффективным инструментом для изучения процессов, протекающих в окрестности релятивистских объектов. Фотоны и антифотоны можно будет сепарировать, принимать с огромных расстояний и с высочайшей степенью точности измерять их параметры. Это может иметь не только чисто научное значение, но и широкое практическое применение.

В двузнаковой гравитации гравитационная нейтральность Вселенной вовсе не означает, что она таковой является на любых масштабах. Согласно этой теории существует естественный и регулярный механизм возникновения и роста гравитационно-связанных структур в симметричной Вселенной, состоящей из частиц и античастиц. Показано, что ещё в ранней Вселенной произошёл её распад на миры и антимиры. Миры – области, не содержащие антивещества, а антимиры – вещества. Распад был обусловлен наличием антитяготения между частицами и античастицами и тяготения между частицами и частицами, античастицами и античастицами.

Проблема начальных возмущений в рамках двузнаковой гравитации рассматривается без каких-либо произвольных предположений. Считается, что

начальными возмущениями являются тепловые флуктуации. Флуктуации повышенной плотности частиц создавали локальные гравитационные поля. Они втягивали в эти флуктуации частицы и выталкивали из них античастицы. Это создавало их регулярный рост. Симметричный процесс имел место во флуктуациях повышенной плотности античастиц.

В гл. 25 описан рост флуктуаций, размер которых совпадает с размером причинно-связанных областей. Чтобы получить согласие с наблюдениями, считается, что первоначально они содержали приблизительно $10^{88}$ барионов/антибарионов. Показано, что в ранней Вселенной к началу эпохи аннигиляции барионов/антибарионов амплитуда возмущений плотности вещества/антивещества в этих флуктуациях достигла значений $10^{-10}$–$10^{-9}$. После завершения аннигиляции в рассматриваемых флуктуациях «выжила» приблизительно $10^{-10}$–$10^{-9}$-я часть барионов/антибарионов. Именно это и определило величину барион-фотонного соотношения, наблюдаемого в окружающем нас Мире и являющегося одним из главных параметров в космологии. К концу эпохи аннигиляции барионов/антибарионов возникли зародыши миров и антимиров. Они содержали приблизительно по $10^{79}$–$10^{80}$ барионов/антибарионов. Распад Вселенной на миры и антимиры завершился к концу эпохи аннигиляции электрон-позитронных пар. Наш Мир является лишь одним из миров.

Согласно двузнаковой гравитации миры и антимиры отталкиваются. Они вовсе не стремятся сближаться и сталкиваться, и вследствие этого, на границах их раздела, процессы аннигиляции вещества и антивещества практически не протекают. Предположительно, миры и антимиры распределены в пространстве регулярно. Они «вморожены» в равномерно расширяющийся вакуум. Их характерный современный размер приблизительно 14 млрд световых лет. Имеются основания предполагать, что миры и антимиры наблюдаются как относительно яркие пятна на почти однородном фоне реликтового излучения, имеющие характерный угловой размер около одного градуса.

Миры и антимиры являются самыми крупными неоднородностями в распределениях барионной и антибарионной компонент космической среды во Вселенной. В процессе её расширения каждый из миров распался на множество более мелких фрагментов (звёзды, галактики, скопления галактик, межгалактические облака горячей плазмы и др.). Аналогичный процесс распада на более мелкие элементы имел место в антимирах. Согласно двузнаковой гравитации миры и антимиры, а также структуры, из которых они состоят, являются лишь «мелкой рябью» в однородном море электро- и гравитационно-нейтрального физического вакуума.

В соответствии с двузнаковой гравитацией должны наблюдаться особенности, связанные с различием миров и антимиров. Например, следует ожидать различия круговых поляризаций излучения, приходящего из соседних пятен, на реликтовом фоне. По-видимому, мы не находимся в центре Мира, и естественно

предполагать, что это также проявится в наблюдениях. Должна существовать дипольная компонента анизотропии в распределении яркости миров и антимиров на равномерном фоне реликтового излучения, а также и их угловых размеров.

Теоретически допустим вариант теории гравитации, в котором некоторые из частиц тождественны своим античастицам и имеют гравитационный заряд, равный нулю. Как и в двузнаковой гравитации, в этом варианте сохранена идея Эйнштейна о взаимосвязи гравитации с геометрическими свойствами пространства-времени. Считается, что источниками гравитационного поля являются инвариантные гравитационные заряды – аналоги электрических зарядов. Сохранения гравитационных зарядов отдельных частиц и античастиц не предполагается. Они могут рождаться и уничтожаться. Сохраняется лишь полный гравитационный заряд Вселенной, и он полагается равным нулю. Этот вариант, вследствие его идейной близости к электродинамике, назван гравидинамикой (см. гл. 26). Вариант теории, в котором у любой частицы существует отличная от неё античастица, в настоящее время рассматривается нами как предпочтительный.

Вследствие распада ранней Вселенной на миры и антимиры и дальнейшей их фрагментации возникло огромное множество областей с нарушенной гравитационной нейтральностью и соответствующих им неоднородных гравитационных полей. Наличие неравномерностей движения космической среды в вакууме сопровождается возникновением инерционных полей, являющихся разновидностью гравитационных полей.

Существенное влияние на гравитационные поля оказывает гравитационная поляризация вакуума. Она связана с различием поведения виртуальных частиц и античастиц в гравитационном поле. Кроме гравитационной поляризации вакуума имеет место и его электрическая поляризация. Вследствие малости действующих между элементарными частицами гравитационных сил, по сравнению с электрическими, пространственно-временной масштаб гравитационной поляризации вакуума на много порядков больше, чем масштаб экранирования электромагнитных полей, связанный с его электрической поляризацией. Проявления электрической и гравитационной поляризаций вакуума отличаются кардинально. Электрическая поляризация вакуума приводит к уменьшению поля электрических зарядов и проявляется на масштабах $\hbar/m\,c$ $\simeq 10^{-12}$ см ($\hbar$ – постоянная Планка, $m$ – масса электрона, $c$ – скорость света). Влияние гравитационной поляризации вакуума на поле гравитационного заряда сложнее: кардинально меняется радиальная структура этого поля; оно оказывается не только полем притяжения, но одновременно и полем отталкивания. Предположительно, масштаб гравитационной поляризации вакуума составляет приблизительно $10^{24}$ см, что в ($e^2\,/\,Gm_p^2 \approx 10^{36}$) раз больше, чем масштаб его электрической поляризации ($G$ – гравитационная постоянная, а $e$ – заряд протона, а $m_p$ – его масса) (см. гл. 27).

* * *

**Благодарности.** Авторы благодарны И. Г. Шухману, Д. С. Горбунову, Н. Г. Мигранову, А. В. Лаппе, С. В. Клименко, а также В. М. Ярцеву за полезные обсуждения и ценные советы.

Выражаем глубокую благодарность А. Д. Долгову, А. Г. Жилкину, М. Л. Миллеру и В. А. Рубакову за критические замечания, существенно повлиявшие на наше осмысление двузнаковой гравитации.

Выражаем благодарность В. Д. Бучельникову и А. В. Мельникову за содействие в публикации наших работ, лежащих в основе настоящей книги.

Благодарны А. Г. Пашнину за помощь в редактировании книги, многочисленные и ценные замечания по изложению материала.

Авторы благодарят Р. А. Фролову за помощь при подготовке рукописи к печати.

Большое влияние на наше видение обсуждаемых в настоящей книге проблем оказал наш Учитель, академик РАН А. М. Фридман. Он поддерживал наши исследования и активно в них участвовал. Прекрасные человеческие качества Алексея Максимовича, его беззаветная преданность физике были и остаются для нас вдохновляющим примером.

Особую благодарность выражаем нашим близким, прежде всего Т. И. Клименко. В значительной степени благодаря их внимательному отношению к нам эта работа была выполнена.

ЧАСТЬ I

# КАЧЕСТВЕННОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ДВУЗНАКОВОЙ ГРАВИТАЦИИ

# ГЛАВА 1

# ЧАСТИЦЫ И АНТИЧАСТИЦЫ ВО ВСЕЛЕННОЙ

*Природа не может не воспользоваться красивой, математически элегантной возможностью.*

**П. А. М. Дирак**

## 1.1. Частицы и античастицы

В 1928 г. П. А. М. Дирак нашёл релятивистское квантовое волновое уравнение для точечных частиц со спином $s = 1/2$. Из анализа решений найденного им уравнения, в 1931 г. Дирак делает вывод, что оно, наряду с описанием известных в то время электрона и протона, описывает также подобные им, но с противоположными по знаку электрическим зарядом и магнитным моментом частицы. Он предполагает, что в природе такие частицы должны реально существовать. Для их обозначения он использует приставку «анти» (антиэлектрон, антипротон). Его выводы оказались пророческими. Уже в 1932 г. была открыта первая античастица – позитрон (антиэлектрон).

Позже было установлено, что античастицы существуют и у частиц с целым спином. Было показано, что кроме электронов и протонов существует множество других частиц и соответствующих им античастиц. В подавляющем большинстве они нестабильны. Конечными продуктами их распада являются стабильные частицы: электроны ($e$), протоны ($p$), связанные в ядрах нейтроны ($n$), нейтрино ($\nu$) трёх поколений, фотоны ($\gamma$), а также их античастицы: $\overline{e}, \overline{p}, \overline{n}, \overline{\nu}$ и $\overline{\gamma} \equiv \gamma$. Сейчас существование для любой частицы соответствующей ей античастицы полагается само собой разумеющимся. Считается, что некоторые частицы, например, фотоны, $\pi^0$-, и $\eta^0$-мезоны, совпадают со своими античастицами [53].

Главная отличительная черта частиц-античастиц – их способность к аннигиляции. Аннигиляция – процесс превращения пары частица/античастица в другие элементарные частицы, рождение которых разрешено законами сохранения зарядов. Конечными продуктами аннигиляции являются фотоны, нейтрино и их античастицы, но, возможно, в процессе аннигиляции возникают и другие слабовзаимодействующие массивные частицы и их античастицы. Из последних, предположительно, состоит так называемая тёмная материя, природа которой в настоящее время не вполне ясна [19].

Для рождения пары частица/античастица необходима энергия, не меньшая, чем $2mc^2$, где $m$ – их масса, $c$ – скорость света. Рождение пар частица/античастица может происходить за счёт кинетической энергии сталкивающихся

частиц. Если космическая среда находится в термодинамическом равновесии и имеет температуру $T$, то, в среднем, на каждую её частицу приходится кинетическая энергия порядка $k_B T$, где $k_B$ – постоянная Больцмана. Чтобы в результате столкновения двух частиц произошло рождение пары частица/античастица, кинетическая энергия сталкивающихся частиц должна быть достаточно большой. Это имеет место, если температура среды $T$ порядка и выше пороговой температуры $T_п$. Значение этой температуры находится из равенства $k_B T_п = m c^2$, где $m$ – масса частиц/античастиц, условия для рождения которых рассматриваются в [19; 53].

Скорость рождения/уничтожения частиц/античастиц тем выше, чем значительнее превышение температуры космической среды над пороговой для рассматриваемой пары. В ранней Вселенной при температурах космической среды заметно больших, чем пороговая, для частиц/античастиц рассматриваемого сорта с высокой скоростью шли процессы их рождения/уничтожения. Достигалось равенство скоростей их рождения и уничтожения, устанавливалось кинетическое равновесие между рассматриваемыми частицами/античастицами и продуктами их аннигиляции. Для электрон-позитронных пар $T_п = 6 \cdot 10^9$ К, а для протонов/антипротонов $T_п = 1{,}2 \cdot 10^{13}$ К. В космической среде при температурах, больших $6 \cdot 10^9$ К, много электрон-позитронных пар, при температурах, больших $1{,}2 \cdot 10^{13}$ К, – много протон-антипротонных пар. Аналогичные суждения могут быть высказаны и для других пар частиц/античастиц.

При температурах, заметно меньших пороговой для рассматриваемых частиц/античастиц, рождение частиц/античастиц практически не происходит и они могут лишь аннигилировать.

## 1.2. Идея «симметричной» Вселенной

Из частиц построено всё многообразие веществ окружающего нас Мира. В теории нет запретов на существование антивещества и антимиров. В теорию частицы и античастицы входят равноправно. Учитывая это, естественно думать, что во Вселенной частицы и античастицы должны присутствовать в равных количествах.

Впервые предположение о симметрии Вселенной относительно частиц и античастиц высказал Дирак в 1933 г. в лекции, прочитанной на вручении Нобелевской премии: «Если мы станем на точку зрения, что полная симметрия между положительными и отрицательными электрическими зарядами является фундаментальным законом природы, то мы должны рассматривать как своего рода случайность, что Земля и, вероятно, вся Солнечная система содержит избыток обычных электронов и положительных протонов. Вполне возможно, что некоторые звёзды построены иным путём, именно, главным образом, из

позитронов и отрицательных протонов. Конечно, в мире должно быть одинаковое число звёзд каждого сорта. Оба сорта звёзд будут иметь в точности одинаковые спектры, и в настоящее время нет возможности различить их каким-либо астрономическим методом».

Красивая идея симметричной по веществу и антивеществу Вселенной имела многочисленных сторонников. Применительно к различным явлениям во Вселенной она уже давно обсуждалась и изучалась. Приведём лишь несколько мнений, высказывавшихся по этому поводу.

Лауреат Нобелевской премии Х. Альфвен: «Половина звёзд и комет в Галактике состоит из антивещества» [2].

Академик АН СССР Б. П. Константинов: «Некоторые метеоры состоят из антивещества. Имеется корреляция между появлением отдельных метеоров и повышением интенсивности потоков высокоэнергичных гамма-квантов ($E > 100$ МэВ)» [44].

Известный английский астрофизик Р. Омнес: «Разделение вещества и антивещества произошло в ранней Вселенной. Области вещества и антивещества разошлись на космологические расстояния» [95].

## 1.3. Барионная асимметрия

Фундаментальная физическая теория не отдаёт предпочтения частицам перед античастицами, веществу перед антивеществом. Естественно было ожидать, что во Вселенной вещество и антивещество присутствует в равных количествах. Предпринимались многочисленные попытки обнаружения антивещества. Идеи его обнаружения основываются на регистрации продуктов аннигиляции частиц и античастиц [18; 27].

На основании множества наблюдений утвердилось широко распространённое мнение: антивещества в современной Вселенной в заметных количествах нет.

Объяснение наблюдаемого «перекоса» окружающего нас мира в сторону частиц (вещества) является одной из фундаментальных проблем современной физической науки. В теории это наблюдаемое нарушение симметрии в сторону частиц определяют термином «барионная асимметрия». Широко распространено следующее мнение: барионная асимметрия является глобальной, и современная Вселенная состоит лишь из вещества.

## 1.4. «Лишние» барионы

Наблюдения показывают, что в современной Вселенной количество фотонов на 9-10 порядков больше, чем барионов. В то же время считается, что в ранней Вселенной в эпохи до барион-антибарионной аннигиляции их количества были приблизительно одинаковыми [18; 27]. Считают, что в процессе аннигиляции количество барионов уменьшилось приблизительно в миллиард раз. При этом количество фотонов, нейтрино и их античастиц возросло приблизительно вдвое. Все антибарионы проаннигилировали. Остались только «лишние» барионы, для которых не нашлось партнёров, а их в эпоху аннигиляции было приблизительно одна миллиардная часть от общего количества барионов. Параметр $\eta_B \approx 10^{-10}$–$10^{-9}$, определяющий соотношение между количествами барионов и фотонов в современной Вселенной, является одним из важнейших параметров в космологии. Считают, что он определяет долю «лишних барионов» во Вселенной на начало эпохи их аннигиляции.

Считается, что на всех этапах эволюции Вселенной отсутствовал регулярный механизм разделения частиц и античастиц, и в ранней Вселенной они были равномерно перемешаны. С учётом этого показано, что если бы Вселенная была симметричной по частицам и античастицам, то к настоящему времени все частицы и античастицы, по крайней мере, $e$, $\overline{e}$, $p$, $\overline{p}$, $n$ и $\overline{n}$, должны были проаннигилировать. При снижении температуры космической среды ниже пороговой для рождения этих частиц/античастиц падение их концентраций происходило по экспоненциальному закону, с характерным временем «вымирания», значительно меньшим возраста Вселенной. В рамках современной космологической модели ($\Lambda$CDM) показано, что в «симметричной» Вселенной совершенно исключена возможность «выживания» какого-либо заметного количества барионов/антибарионов позже, чем через $10^{-3}$ с после начала расширения Вселенной. В такой Вселенной отсутствовали бы не только антимиры, но и миры [27].

Согласно существующим представлениям современная Вселенная не является симметричной по частицам и античастицам. Считается, что она состоит из «лишних» барионов, возникших в ранней Вселенной, и сохранившихся после эпохи аннигиляции барионов и антибарионов. Предполагают, что ещё в ранней Вселенной на каждый миллиард пар барионов и антибарионов возник приблизительно один «лишний» барион. Обсуждаются различные механизмы создания «лишних» барионов в экстремальных условиях, характерных для ранней Вселенной [18]. Их связывают с нарушением симметрии в реакциях рождения/уничтожения частиц/античастиц. Считается, что в дальнейшем, в процессе расширения Вселенной и её остывания весь симметричный мир пар частиц/античастиц проаннигилировал. Остались лишь те барионы, для которых не нашлось партнёров, а также необходимое для электронейтральности Вселенной количество электронов.

## 1.5. «Второстепенные факты»

Чтобы объяснить наличие «лишних» барионов, усложняют квантовую теорию, допуская возможность нарушения при высоких энергиях симметрии в процессах рождения/уничтожения частиц/античастиц.

Объясняя наблюдения, жертвуют красотой квантовой теории, отказываясь от идеи симметричности Вселенной по частицам и античастицам. Неужели П. А. М. Дирак был не прав, когда утверждал: «Красивая теория не может быть неверной»? Предвидя такую возможность, в защиту этого тезиса он высказал следующее соображение: «Если в каком-то случае применения красивой и логически замкнутой теории появляются расхождения с наблюдениями, то их причиной, видимо, становятся *второстепенные факторы*, которые относятся к этому применению и которые не были должным образом учтены, но никак не неправильность общих принципов теории».

Спросим себя: возможно ли, не вступая в противоречие с наблюдениями, сохранить красивую идею о симметрии Вселенной по частицам и античастицам? Полагаем, что это возможно, если предположить следующее. Во Вселенной существовали условия её распада на миры и антимиры. Этот распад произошёл ещё в ранние эпохи её эволюции. «Вмороженные» в расширяющееся пространство Вселенной миры и антимиры разошлись на космологические расстояния. Современная Вселенная состоит из бесконечного множества миров и антимиров, каждый из них имеет характерный размер около 14 млрд световых лет и содержит приблизительно по $10^{79}$–$10^{80}$ шт. барионов/антибарионов. В рамках такого объяснения наблюдаемый «перекос» Вселенной в сторону частиц является кажущимся. В этом случае прав был Р. Омнес, утверждавший, что в симметричной Вселенной произошёл её распад на миры и антимиры [95]. Мы живём в Мире, который является лишь одним из них.

Идея Омнеса в последнее время обсуждается редко. При всей красоте замысла, она встречается с такими трудностями, которые заставляют отказаться от предлагаемого Омнесом сценария эволюции Вселенной. Главная трудность реализации этой идеи заключается в отсутствии естественного механизма зарождения и регулярного роста миров и антимиров во Вселенной.

В современной космологии считается, что фактором, определяющим динамику Вселенной, является гравитация. Идея Омнеса обсуждалась в рамках эйнштейновской теории гравитации (ОТО), которая не различает частицы и античастицы и поэтому не содержит регулярного механизма их разделения. Предлагаемое Р. Омнесом объяснение того, как это разделение происходило, не выдерживает критики [27].

Предполагаем, что если хотеть сохранить красивую идею симметричной по частицам и античастицам Вселенной, то, учитывая замечание П. А. М. Дирака, следует понять, в чём может заключаться *«второстепенный фактор»*, отно-

сящийся к применению этой красивой идеи и который ранее не учитывался. Этим фактором, по нашему мнению, является неточность стандартной ОТО. Эта теория не различает частицы и античастицы, а вследствие этого не содержит в себе естественного и регулярного механизма их разделения. Если не считать, что это представление современной теории гравитации является правильным, то можно не только «спасти» идею симметричной по частицам/античастицам Вселенной, но и, уточнив ОТО, сделать теорию гравитации более красивой и содержательной. Для этого необходимо предполагать, что гравитация, как и другие фундаментальные взаимодействия, различает частицы и античастицы. В следующей главе даётся качественное описание теории гравитации, основанной на этом предположении.

# ГЛАВА 2

# ГРАВИТАЦИЯ, ТЯГОТЕНИЕ И АНТИТЯГОТЕНИЕ

*В отсутствие экспериментальных запретов существует возможность гипотетически предполагать, что в реальности гравитация различает частицы и античастицы, а обратное утверждение, содержащееся в ОТО, не является правильным.*

**А. В. Клименко, В. А. Клименко** [92]

## 2.1. Ньютоновская гравитация

Динамику космической среды на больших масштабах определяет гравитация.

Теория гравитации начиналась с закона всемирного тяготения Ньютона. Согласно этому закону между любыми точечными массами $m_1$ и $m_2$ действует сила притяжения, пропорциональная их массам и обратно пропорциональная квадрату расстояния $r_{12}$ между ними:

$$F = -G\frac{m_1 m_2}{r_{12}^2}. \tag{2.1}$$

Знак минуса в этой формуле означает, что действует сила притяжения, а не отталкивания. Считается, что массы любых объектов всегда положительны. Универсальная константа $G$ называется гравитационной постоянной. Численное значение

$$G \simeq 6{,}67\cdot 10^{-8}\ \text{г}^{-1}\text{см}^3\text{с}^{-2}. \tag{2.2}$$

В ньютоновской гравитации пространство является евклидовым, а время одинаково текущим во всех его частях. Считается, что инертная и тяжёлая массы любых тел совпадают и все тела, при одинаковых условиях, независимо от их массы и состава, движутся в гравитационных полях одинаково.

Согласно Ньютону пространство и время являются самостоятельными, первичными, нематериальными, независимыми сущностями. Пространство является сценой, на которой протекают все физические процессы, а время это то, что позволяет нумеровать события в соответствии с их причинно-следственной взаимосвязью.

## 2.2. Эйнштейновская гравитация

Развитие физической теории показало ограниченность закона всемирного тяготения (2.1). Согласно этому закону гравитационное взаимодействие распространяется мгновенно. Это означает, что сдвинув массы, мы должны в тот же миг почувствовать изменение силы $F$, стало быть, таким способом можно посылать сигналы с бесконечной скоростью.

В то же время экспериментально доказано, что существует максимальная скорость распространения взаимодействий, и она имеет одно и то же значение во всех инерциальных системах отсчёта. Эта скорость не зависит от того, движется ли излучатель относительно приёмника или нет. Она совпадает со скоростью распространения света в пустоте; поэтому её называют скоростью света. Численное значение этой скорости

$$c \approx 2{,}998 \cdot 10^{10} \text{ см/с}. \tag{2.3}$$

Современной теорией гравитационного поля, учитывающей конечность скорости распространения гравитационных взаимодействий, а также фундаментальное свойство гравитационных полей, что все тела, вне зависимости от их массы и состава, движутся в них, при заданных начальных условиях, одинаковым образом, является эйнштейновская общая теория относительности (ОТО) [19; 27].

ОТО в корне изменила понимание сущности гравитации. В этой теории считается, что гравитация является проявлением искривлённости пространства-времени. Кратчайшими линиями в искривлённом пространстве-времени являются геодезические. Любое тело, присутствующее в искривлённом пространстве-времени, «чувствует» его и движется по геодезической. Её форма определяется не массой и составом этого тела, а является отражением геометрических свойств пространства-времени. Согласно ОТО, при заданных начальных условиях, тела попадают на одну и ту же геодезическую и движутся одинаково.

Гравитация в рамках ОТО описывается уравнениями Эйнштейна. Левая часть этих уравнений описывает геометрические свойства пространства-времени. Считается, что пространство-время является четырёхмерным римановым многообразием непрерывным, дифференцируемым, описываемым метрическим тензором второго ранга $g_{\mu\nu}$. Зависимость компонент этого тензора от пространственно-временны́х координат описывает геометрию этого многообразия, в частности, определяет в нём геодезические, являющиеся аналогами прямых в евклидовом пространстве. Геометрическая часть уравнений Эйнштейна является сравнительно простой математической конструкцией. Она включает в себя тензор $g_{\mu\nu}$ и его первые и вторые производные по пространственно-вре-

менны́м координатам. При этом производные второго порядка входят в это уравнение линейно.

Правая, материальная часть уравнений Эйнштейна описывает источник искривлённости пространства-времени (гравитационного поля). Им является тензор энергии-импульса космической среды. Важная особенность гравитации – её универсальность. Любая частица участвует в гравитационном взаимодействии. Вклады всех компонент космической среды в тензор энергии-импульса суммируются.

Эйнштейн полагал, что материя, как и гравитационное поле, должна быть геометризована. Его попытки геометризации электромагнетизма не были успешными. Эта задача была решена Т. Калуцей на основе идей пятимерия. Дальнейшее развитие в физике геометрического подхода показало, что путём увеличения размерности пространства можно аналогичным образом геометризовать и другие фундаментальные физические поля [15].

Для макроскопических тел, движущихся со скоростями, много меньшими скорости света, ОТО переходит в ньютоновскую теорию гравитации. Теория Ньютона широко используется на практике. Она становится непригодной в тех случаях, когда гравитационные поля достигают большой величины, например, в окрестности нейтронных звёзд и чёрных дыр, а также на космологических масштабах.

Влияние искривлённости пространства-времени проявляется как малая поправка и в слабых гравитационных полях. Например, в рамках ОТО удалось объяснить не проявляющуюся в рамках ньютоновской гравитации часть прецессии орбиты Меркурия (приблизительно на 43'' за столетие) как обусловленную искривлённостью пространства-времени, создаваемой Солнцем. Очень чувствительные часы могут обнаружить замедление времени, связанное с влиянием гравитационного поля Земли. Для того чтобы обеспечить необходимую точность в навигационных системах ГЛОНАСС и GPS, это влияние учитывается.

Успешное применение общей теории относительности для объяснения наблюдательных данных в Солнечной системе, которые в рамках ньютоновской теории не находили простого и убедительного объяснения, создало имидж ОТО как идеальной теории. Например, утверждалось, что ОТО является самой красивой из существующих физических теорий [46]. В то же время анализ эффективности общей теории относительности в объяснении некоторых явлений в галактиках и их скоплениях, в окрестности релятивистских объектов, а также наблюдаемой динамики Вселенной показывает, что, возможно, нет оснований для такого оптимизма. Выявился ряд проблем, предлагаемые решения которых в рамках ОТО не являются убедительными. Дадим краткое описание двух из них.

## 2.3. Проблема барионной асимметрии

В гл. 1 изложена суть проблемы. Рассмотрим её подробнее. Согласно первоначальному простому и красивому варианту релятивистской квантовой теории [21] существует полная симметрия между частицами и античастицами. Нет причины думать, что во Вселенной одних из них должно быть больше, чем других. В то же время наблюдения показывают, что окружающий нас Мир состоит из вещества (частиц), а антивещество (античастицы) в заметных количествах не обнаруживаются.

Возможна точка зрения, согласно которой наблюдаемая барионная асимметрия не является глобальной и на космологических масштабах в реальности Вселенная симметрична по частицам и античастицам. В природе действовал эффективный механизм распада ранней Вселенной на миры и антимиры. Он был связан с различием влияния гравитации на частицы и античастицы (см. гл. 5 и 25). Эта точка зрения не согласуется с основополагающими принципами общей теории относительности.

В ОТО нет механизма разделения космической среды на миры и антимиры, поскольку в этой теории гравитация не различает частицы и античастицы. Чтобы объяснить наблюдаемую барионную асимметрию окружающего нас Мира, идут не на уточнение ОТО, а на усложнение квантовой теории. Гипотетически считают, что в ранней Вселенной имело место нарушение симметрии в процессах рождения/уничтожения барионов/антибарионов и к началу эпохи их интенсивной аннигиляции количество барионов было приблизительно на одну миллиардную часть больше, чем антибарионов [18; 19].

В современной космологии, основанной на общей теории относительности, предполагается, что в ранней Вселенной барионы и антибарионы были равномерно перемешаны и находились в тесном контакте. Вследствие этого к началу эпохи аннигиляции те из них, для которых были «партнёры», проаннигилировали, «выжили» только «лишние» барионы [18; 27]. Считается, что в последующие эпохи во Вселенной антивещества, состоящего из антипротонов, антинейтронов и позитронов, нет.

Предположение о сохранении равномерной перемешанности барионов и антибарионов во Вселенной основывается на фундаментальном принципе ОТО, согласно которому любые материальные объекты, в том числе частицы и античастицы, при одинаковых начальных условиях, в гравитационном поле движутся одинаково. Вследствие этого нет причин к их разделению. Если вначале они были равномерно перемешаны, то и в дальнейшем это сохранялось.

Можно, конечно, предполагать, что изначально ранняя Вселенная, по какой-то причине, была разделена на области, содержащие только вещество, и области, содержащие лишь антивещество. Если бы это было так, то должны были бы наблюдаться процессы аннигиляции вещества и антивещества

на границах раздела этих областей (миров и антимиров) [82]. «Пятнистость» в распределении материи во Вселенной чётко проявляется. Наблюдаются неоднородности различных масштабов. Некоторые из них соприкасаются и сталкиваются. В то же время наблюдения не указывают явно на то, что на границах каких-либо соприкасающихся неоднородностей идут процессы аннигиляции вещества и антивещества.

Например, широко распространена точка зрения, что наблюдаемую «пятнистость» почти равномерного фона реликтового излучения не следует рассматривать как свидетельство существования в эпоху рекомбинации миров и антимиров. Считается, что чётко проявляющиеся на реликтовом фоне пятна не являются мирами и антимирами. Утверждается, что если бы это было не так, то на границах пятен происходила бы аннигиляция вещества и антивещества и они были бы источниками $\gamma$-излучения, имеющего характерный энергетический спектр. Но его не наблюдают. В рамках ОТО объяснить отсутствие наблюдаемых эффектов аннигиляции на границах раздела миров и антимиров невозможно. В этой теории, в отличие от двузнаковой гравитации, не содержится идеи отталкивания миров и антимиров. Считается, что антивещество исчезло ещё в эпоху аннигиляции вещества-антивещества. Сохранились лишь «лишние» барионы [18; 27].

Приведённые выше аргументы в поддержку идеи «лишних» барионов в качестве причины наблюдаемой барионной асимметрии являются убедительными, если верна гипотеза ОТО о том, что гравитация не различает вещество и антивещество. В этом случае в гравитационном поле при одинаковых начальных условиях любые объекты, в том числе частицы и античастицы, движутся одинаково, и вследствие этого отсутствует регулярный механизм их разделения.

Насколько надёжно проверена эта гипотеза? Имеются ли основания считать, что неразличимость частиц и античастиц в гравитации является строго установленным и надёжно проверенным в наблюдениях и экспериментах фактом?

Часто утверждают, что неразличимость частиц и античастиц в гравитации доказана с высокой степенью точности. При этом ссылаются на эксперименты, относящиеся к доказательству тождественности тяжёлой и инертной масс макроскопических тел различного химического состава, движущихся в гравитационном поле с нерелятивистскими скоростями [10; 102]. Полагаем, что к решению проблемы о том, различает ли гравитация частицы и античастицы или нет, эти эксперименты имеют слабое отношение. В них нет в явном виде ни античастиц, ни антивещества.

ОТО надёжно подтверждена экспериментально для нерелятивистских макроскопических тел, состоящих из вещества. Что касается описания в ОТО влияния гравитационного поля на элементарные частицы и античастицы, то его пока следует рассматривать как гипотетическое. Гравитационные силы,

действующие на отдельные элементарные частицы, слишком слабы, чтобы их можно было измерить непосредственно. Ещё недавно считалось [53], что экспериментально изучать влияние гравитационных полей в микромире невозможно в силу его слабости. В последнее время проводятся экспериментальные исследования влияния гравитации на отдельные элементарные частицы и их античастицы [81]. Эти исследования могут оказать огромное влияние на развитие физики, если в них подтвердится идея, согласно которой между частицами и античастицами действует антитяготение [42; 92]. Отметим также, что вследствие отсутствия макроскопических тел, состоящих из антивещества, экспериментальное исследование влияния на них гравитации не могло быть проведено.

## 2.4. Проблема источников гравитации

В общей теории относительности, чтобы объяснить наблюдаемую динамику галактик и их скоплений, а также динамику Вселенной, предполагают, что приблизительно 96 % энергии космической среды в современной Вселенной содержится в компонентах материи, явно не наблюдаемых и проявляющихся лишь косвенно в гравитации. Считается, что этими компонентами являются тёмная материя (24 %) и тёмная энергия (72 %). Предполагается, что видимая (барионная компонента материи), состоящая из электронов, протонов и нейтронов, содержит в себе лишь приблизительно 4 % энергии Вселенной.

Идея о существовании тёмной материи возникла при объяснении наблюдаемой динамики галактик и их скоплений [19; 27]. Чтобы в рамках ОТО стало возможным объяснение этих наблюдений, предполагают, что на периферии этих структур существует тёмная, невидимая, холодная материя в количестве, приблизительно в 5–6 раз большем, чем то, что в них явно наблюдается. В течение многих десятилетий предпринимались многочисленные, но безуспешные попытки найти источники тёмной материи среди слабосветящихся гравитирующих объектов. Последнее время их пытаются найти среди ещё не открытых слабовзаимодействующих массивных стабильных частиц, но пока также без результата [18; 19]. Возможно, что ищут не то, что надо искать в реальности (см. гл. 27).

Идея о существовании тёмной энергии в значительной степени связана с объяснением наблюдаемой динамики Вселенной в рамках ОТО. Чтобы объяснить наблюдения, предполагают, что кроме компонент космической среды, создающих гравитационные поля притяжения, существует ещё компонента космической среды, которая создаёт не притяжение, а отталкивание, и её влияние проявляется явно лишь на космологических масштабах. Эта компонента в современной космологии определяется термином «тёмная энергия».

Считается, что она является вакуумной формой материи, однородно заполняет Вселенную, и её параметры остаются постоянными в пространстве и времени.

Тёмная материя и тёмная энергия являются гипотетическими средами. Они непосредственно не наблюдаются и используются лишь как теоретически допустимые конструкции, которые позволяют объяснить наблюдения в рамках ОТО. Предполагаемые свойства этих сред существенно отличаются от свойств обычных сред, хорошо изученных, и экспериментально, и теоретически. Объяснение физической природы тёмной материи и тёмной энергии, в предположении правильности основополагающих принципов общей теории относительности, требует значительного усложнения существующей теории [18; 19].

В современной физике считается, что ОТО позволяет правильно описывать динамику галактик и их скоплений, а также динамику Вселенной в целом. Полагают, что существующие трудности этого описания являются временными и связаны с неполнотой знаний о физических свойствах космической среды. Возможно, что это не так и главная причина трудностей не в неполноте знаний о космической среде, а в ограниченности принципов ОТО. Вследствие этого существует ошибочное понимание свойств важнейших компонентов космической среды и их роли в динамике Вселенной и её структур.

В следующем пункте приведены аргументы в поддержку этой точки зрения.

## 2.5. Двузнаковая гравитация

Считаем, что причиной фундаментальных проблем современной космологии, в частности, описанных в п. 2.3 и 2.4, является ограниченность общей теории относительности. Имеются веские причины сомневаться в правильности гипотез, лежащих в её основе, а именно:

1а. Гравитация не различает частицы и античастицы. Между любыми частицами и античастицами существует тяготение. Современная Вселенная состоит лишь из частиц.

2а. Главное влияние на динамику современной Вселенной оказывает вакуумная материя, называемая тёмной энергией.

В квантовой теории различие частиц и античастиц является доказанным фактом. В то же время эйнштейновская гравитация их не различает, хотя в прямом эксперименте это не доказано. В силу сложности экспериментальной проверки гипотезы о неразличии частиц и античастиц в гравитации соответствующие исследования пока находятся лишь в зачаточном состоянии [81].

В квантовой теории основополагающей сущностью мира является физический вакуум. В ОТО считается, что тёмная энергия является вакуумной

материей. В то же время, оставаясь в рамках этой теории, установить связь между тёмной энергией и физическим вакуумом не удаётся (см. гл. 20).

В отсутствие убедительных теоретических и экспериментальных доказательств приведённых гипотез была предложена теория гравитации, основанная на альтернативных им гипотезах [34; 42; 92]. Их содержание заключается в следующем.

1б. Реальная гравитация различает частицы и античастицы и между ними существует антитяготение. Вселенная симметрична по частицам и античастицам и является не только электро-, но и гравитационно-нейтральной.

2б. Главной компонентой космической среды является физический вакуум. Он однородно заполняет Вселенную. Частицы и античастицы являются его возбуждёнными состояниями. Частицы – состояниями с положительной энергией, а античастицы – состояниями с отрицательной энергией. Энергия и гравитационный заряд являются тождественными понятиями. Античастицы рассматриваются как частицы, но с отрицательной энергией и движущиеся во времени вспять.

Теория гравитации, в основе которой лежат эти гипотезы, названа авторами двузнаковой гравитацией.

Чтобы согласовать идею о «гравитационных зарядах» с существующими представлениями о том, что все компоненты космической среды являются источниками гравитационного поля, считается, что у любой частицы, в том числе и у фотона, существует античастица. В двузнаковой гравитации частицы и античастицы имеют противоположные по знаку энергии, а следовательно, и противоположные по знаку гравитационные заряды. При этом одноимённые заряды притягиваются, а разноимённые отталкиваются, и поэтому, кроме тяготения, существует и антитяготение.

В двузнаковой гравитации основополагающей является идея о различии знаков энергии у частиц и античастиц. Поясним, каким образом эта идея возникла и почему была нами введена в теорию гравитации.

## 2.6. Двузнаковость энергии

Идея о различии знаков энергии у частиц и античастиц впервые возникла в квантовой теории, когда Дирак попытался написать волновое уравнение для электрона, которое было бы согласовано с принципами теории относительности. Потребовав, чтобы решениями этого уравнения были волны де Бройля, подчиняющиеся вероятностной интерпретации, и чтобы энергия $E$ и импульс $p$ электрона были связаны релятивистским соотношением

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2, \tag{2.4}$$

а не классическим соотношением $E = p^2/2m$, Дирак установил, что электрон может находиться в четырёх состояниях [21]. Можно считать, что электрон описывается волной де Бройля и квантовым числом, принимающим четыре значения.

В отличие от нерелятивистской теории Шрёдингера, в которую спин вводился извне для объяснения наблюдаемого удвоения некоторых спектральных линий, в теории Дирака спин появился как следствие согласования волнового уравнения с принципом относительности. Согласно теории Дирака электрон обладает спином, причём он равен $\hbar/2$, кроме того, величина собственного магнитного момента, связанного со спином, совпадает с наблюдаемой. Так впервые удалось объяснить внутреннее свойство частицы, и оно автоматически содержалось в уравнении, правильно описывающем её релятивистские свойства.

Появление дополнительного удвоения решений уравнений Дирака, кроме удвоения, связанного с наличием у электрона спина, обусловлено тем, что каждому значению импульса соответствуют два значения энергии. Согласно (2.4)

$$E = \pm(m^2 c^4 + p^2 c^2)^{1/2}. \tag{2.5}$$

В теории Дирака для каждого направления спина имеются два решения, отличающиеся знаком энергии. Вектор состояния электрона является четырёхкомпонентным.

В основе двузнаковой гравитации лежит гипотеза: для любых микрочастиц имеет место удвоение количества решений, описывающих их квантовые свойства; удвоение связано с наличием в формуле (2.5) двух знаков. Состояния с положительной и отрицательной энергией трактуем как описывающие частицы и античастицы соответственно. Принимая эту гипотезу, пытаемся сблизить теорию гравитации с квантовой теорией.

Обычно считают, что античастицы интерпретировать как состояния с отрицательной энергией нельзя. Полагают, что античастица с отрицательной энергией вела бы себя чрезвычайно странно. Считают, что в результате взаимодействия с другими частицами и античастицами античастица с отрицательной энергией ускорялась бы всё больше и больше, пока её энергия не стала бы равной $-\infty$. Согласно двузнаковой гравитации эта точка зрения является ложной. В реальности античастицу следует рассматривать не просто как частицу с отрицательной энергией, но ещё и учитывать, что для неё время течёт в противоположном направлении по сравнению с направлением времени для частиц [86]. С учётом этого античастице, находящейся в возбуждённом состоянии с энергией $E < -m c^2$, в результате взаимодействия с другими частицами и античастицами, более вероятно перейти не в состояния с ещё меньшей

энергией, а в состояние с энергией $E = -m\,c^2$. В настоящей книге статистические свойства систем, состоящих из частиц и античастиц, не обсуждаются. В то же время неявно предполагается, что их поведение является совершенно симметричным.

Частицы и античастицы рассматриваются как возбуждённые состояния вакуума. Частицы соответствуют состояниям с положительной энергией, а античастицы – состояниям с отрицательной энергией. Считается, что они являются двумя совершенно равноправными компонентами космической среды и их описание является симметричным. Предполагается, что главной компонентой космической среды является вакуум.

Идея двузнаковости энергии частиц и античастиц может быть согласована с законами сохранения энергии, импульса и вращательного момента в элементарных процессах. Чтобы это стало возможным, в двузнаковой гравитации любая античастица рассматривается как частица, но с отрицательной энергией и движущаяся во времени вспять. Такое представление о соотношении между частицами и античастицами предполагается и в релятивистской квантовой теории [86].

## 2.7. Двузнаковая гравитация и ОТО

Идейно двузнаковая гравитация близка к общей теории относительности. В обеих теориях величинами, описывающими гравитационное поле, являются компоненты метрического тензора, определяющие геометрические свойства пространства-времени. В двузнаковой гравитации, как и в ОТО, источником гравитационного поля является тензор энергии-импульса. Принципиальное отличие двузнаковой гравитации от эйнштейновской заключается в том, что вклады частиц и античастиц в этот тензор в первой из них вычитаются, а во второй – суммируются. Причина этого отличия в том, что эйнштейновская гравитация не учитывает различие знаков энергий частиц и античастиц, а в двузнаковой гравитации это различие является основополагающим принципом.

В двузнаковой гравитации считается, что Вселенная симметрична по частицам и античастицам, при этом её полный гравитационный заряд равен нулю и она гравитационно-нейтральна. Полные гравитационные заряды (энергии), связанные с частицами и античастицами, равны друг другу по величине, но противоположны по знаку. В ходе эволюции Вселенной они могут меняться, но при этом имеет место сохранение её полного гравитационного заряда. Он всегда равен нулю.

Согласно эйнштейновской теории в гравитационном поле при одинаковых начальных условиях любые частицы и античастицы приобретают одинаковые

по величине и знаку ускорения и движутся по одинаковым траекториям. Другая ситуация в двузнаковой гравитации. При одинаковых начальных условиях частицы и античастицы приобретают одинаковые по величине, но противоположные по знаку ускорения и движутся по различным траекториям. При этом все частицы движутся одинаково, то же самое имеет место и для античастиц. Частицы и античастицы воспринимают гравитационное поле по-разному. Геодезические для частиц и античастиц не совпадают.

Как и в эйнштейновской гравитации, в двузнаковой гравитации считается, что гравитационное поле является тем, что определяется отклонением геометрии пространства-времени от геометрии локально инерциальных систем отсчёта специальной теории относительности (СТО). Пространство-время, соответствующее гравитационному полю, является искривлённым. Его геометрические свойства определяются распределением материи, её движением и физическими параметрами [19; 27]. При этом, кроме реальных частиц и античастиц, учитывается ещё и вакуумная материя. В двузнаковой гравитации считается, что именно она и является главной компонентой космической среды. Вакуум и пространство-время рассматриваются как единый физический объект (см. гл. 3).

Искривлённость пространства-времени и деформация связанного с ним вакуума взаимосвязанные вещи. Согласно двузнаковой гравитации гравитационно-нейтральный вакуум в окрестности любой точки Вселенной выделяет привилегированную локально-инерциальную систему отсчёта. Частицы и античастицы являются возбуждёнными состояниями вакуума. В классическом приближении значения их параметров зависят от скорости движения в нём. С учётом этого формулы специальной теории относительности следует рассматривать не как кинематические, а как динамические. В локально-инерциальных системах отсчёта, движущихся относительно вакуума, должна наблюдаться анизотропия параметров частиц и античастиц (см. гл. 21).

В двузнаковой гравитации даётся объяснение природы сил инерции, отличное от предлагаемого общей теорией относительности. Считается, что эти силы являются материальными по своей природе и связаны с взаимодействием частиц и античастиц с вакуумом. Они возникают в тех случаях, когда меняется скорость или направление их движения в нём. Изменение параметров частиц/античастиц – это одновременно и самосогласованное с ним изменение параметров вакуума–пространства–времени. Реакция вакуума на это изменение проявляется в виде действия на частицы и античастицы сил инерции.

Априори нет оснований считать, что действие вакуума на частицы и античастицы при одинаковых условиях является одинаковым. В двузнаковой гравитации не только гравитация, но и инерция является двузнаковой (см. гл. 22).

В двузнаковой гравитации у любой частицы, в том числе и у фотона, существует античастица. Длительность между двумя событиями, происходящими в

одной и той же точке гравитационного поля и воспринимаемыми удалённым наблюдателем, зависит от того, приносят ли ему информацию об этих событиях – фотоны или антифотоны. У них по-разному в гравитационном поле изменяются длины волн (см. гл. 16 и 23).

Там, где для фотонов в гравитационном поле имеет место красное гравитационное смещение длины волны, для антифотонов имеет место синее гравитационное смещение, и наоборот. Например, в ОТО показано, что при падении излучателя на чёрную дыру и приближении к горизонту событий его скорость и частота излучения, воспринимаемые внешним наблюдателем, уменьшаются до нуля. В двузнаковой гравитации это будет выглядеть так только в фотонной части излучения. В антифотонной части излучения совершенно иначе, чем в фотонной, будет восприниматься как сам процесс падения излучателя на чёрную дыру, так и изменение частоты его излучения. Должна наблюдаться вспышка яркости излучения в момент приближения излучателя к центру чёрной дыры. В гл. 23 показано, что наблюдаемые гамма-всплески, возможно, связаны с падением компактных звёзд (белых карликов и нейтронных звёзд) на массивные чёрные дыры и с наличием в излучении антифотонной компоненты.

Согласно двузнаковой гравитации в гравитационном поле по-разному изменяются длины волн любых частиц и античастиц. Они воспринимают это поле по-разному: что для частиц является полем притяжения, то для античастиц – полем отталкивания, и наоборот. Поэтому описания одного и того же гравитационного поля в представлениях частиц и античастиц не совпадают. В двузнаковой гравитации свойства гравитационного поля зависят не только от выбора тела отсчёта, но и от того, из чего это тело состоит: из вещества или антивещества.

В двузнаковой гравитации удобными являются понятия, определяемые терминами «миры» и «антимиры». Они обозначают области Вселенной, содержащие соответственно только барионы или только антибарионы. В предельных случаях миров и антимиров уравнения двузнаковой гравитации в случаях, когда несущественны эффекты гравитационной поляризации вакуума, переходят в уравнения общей теории относительности.

Окружающая нас часть Вселенной является Миром, и поэтому здесь влияние антиматерии на динамику космической среды в явном виде обычно не проявляется и расчёты в рамках ОТО часто подтверждаются наблюдениями. Но, возможно, что уже на галактических масштабах применение этой теории не является обоснованным (см. гл. 27).

Следует также иметь в виду, что антиматерия может рождаться в Мире. На релятивистских стадиях эволюции массивных тел (нейтронных звёзд, чёрных дыр) в их окрестностях с высокой скоростью могут идти процессы рождения/уничтожения частиц/античастиц. При этом вследствие различия знаков гравитационных зарядов может происходить эффективное разделение частиц

и античастиц. Рождённое в окрестности этих объектов антивещество может выбрасываться в окружающее их пространство. Это будет оказывать существенное влияние на их эволюцию, а также на свойства приходящего от них излучения. С учётом эффектов антитяготения между веществом и антивеществом можно значительно проще, чем в рамках ОТО, понять и объяснить то, что происходит и наблюдается в окрестности релятивистских объектов: выбросы материи с огромными скоростями, $\gamma$-излучение, спектр которого соответствует аннигиляции электрон-позитронных пар и многое другое [54; 56; 69].

## 2.8. Проблема сингулярностей в гравитации

В двузнаковой гравитации, с учётом антитяготения между частицами и античастицами, совершенно иначе, чем в ОТО, видится решение проблемы сингулярностей в гравитации.

Наличие в решениях ОТО сингулярностей указывает на ограниченность этой теории. Обычно считается, что это должно явно проявляться на планковских масштабах [19; 27]: $l_g = (G\hbar/c^3)^{1/2} \simeq 1{,}6 \cdot 10^{-33}$ см, $t_g = l_g/c = (G\hbar/c^5)^{1/2} \simeq 5{,}3 \cdot 10^{-44}$ с, где $\hbar$ – постоянная Планка.

В ОТО, не различающей частицы и античастицы, нет механизма ограничения роста гравитационных сил. Увеличение концентрации энергии приводит к усилению гравитации. Чем больше концентрация энергии, тем больше гравитационное поле, и наоборот. Это по существу и является причиной возникновения сингулярностей в ОТО. Их примером являются чёрные дыры [51; 63].

Совершенно другая ситуация в двузнаковой гравитации. На масштабах $l < \hbar/m\,c$, $t < \hbar/m\,c^2$ ($m$ – масса электрона), значительно бóльших, чем планковские, имеет место непрерывное рождение/уничтожение виртуальных частиц/античастиц. Вследствие антитяготения между частицами и античастицами на этих масштабах включается механизм ограничения роста гравитационных полей. В двузнаковой гравитации такой механизм возможен, а в ОТО его нет. Есть основания предполагать, что в будущей квантовой двузнаковой гравитации сингулярности в решениях, описывающих динамику космической среды, будут отсутствовать. Уже на масштабах $l \leqslant \hbar/m\,c \approx 10^{-12}$ см, $t \leqslant \hbar/m\,c^2 \approx 10^{-23}$ с пространство-время проявляет квантовые свойства и классическое описание должно быть заменено на квантовое.

## 2.9. Гравидинамика

Теоретически возможен вариант теории гравитации, различающей частицы и античастицы, но отличающейся от описанного в п. 2.5 определением

источников гравитационного поля. Считается, что ими являются инвариантные гравитационные заряды и их токи. Предполагается, что у частиц и соответствующих им античастиц гравитационные заряды равны по величине, но противоположны по знаку. Величина гравитационного заряда частиц/античастиц определяется их массой [43].

Идея о гравитационных зарядах и их токах как источниках гравитационного поля является аналогичной идее об электрических зарядах и их токах как источниках электромагнитного поля. Учитывая это, этот вариант двузнаковой гравитации, по аналогии с электродинамикой, называем гравидинамикой (см. гл. 26).

В гравидинамике сохранена идея Эйнштейна о взаимосвязи гравитации с геометрическими свойствами пространства-времени. «Геометрические» части уравнений ОТО и гравидинамики имеют одинаковый вид. Различие этих уравнений заключается в описании источников гравитационного поля.

В гравидинамике в отличие от электродинамики одноимённые заряды притягиваются, а разноимённые отталкиваются. Другое их кардинальное отличие в величине констант взаимодействия. Константа взаимодействия гравитационных зарядов на много порядков меньше, чем электрических зарядов. На масштабах, где обычно применяется квантовая электродинамика, влияние гравитационного взаимодействия частиц/античастиц является несущественным.

В гравидинамике, как и в двузнаковой гравитации, считается, что Вселенная является симметричной по частицам и античастицам, а заполняющей её вакуумной материей является гравитационно-нейтральная материя [34]. Полный гравитационный заряд Вселенной равен нулю, и она является гравитационно-нейтральной. Имеет место закон сохранения полного гравитационного заряда Вселенной. Сколько положительного гравитационного заряда, связанного с частицами, рождается/уничтожается, столько же одновременно рождается/уничтожается отрицательного гравитационного заряда, связанного с античастицами. В отличие от двузнаковой гравитации в гравидинамике некоторые частицы могут совпадать со своими античастицами, и в этом случае их гравитационный заряд равен нулю.

В связи с идеей об инвариантных гравитационных зарядах важной является задача их определения для отдельных частиц и античастиц. В гравидинамике считается, что величины этих зарядов определяются их массами и у частиц и античастиц они имеют разный знак. О допустимости в теории идеи об отрицательности массы у античастиц см. разд. 16.9.

Так как масса фотонов равна нулю, то считается, что они являются гравитационно-нейтральными. То, что они в гравитационном поле движутся не по прямой, это вовсе не означает, что это противоречит идее об их гравитационной нейтральности. В искривлённом пространстве-времени других «прямых», кроме геодезических, нет.

В гравидинамике, как и в двузнаковой гравитации, представления частиц и античастиц о метрических свойствах пространства-времени отличаются. Геодезические в представлениях частиц и античастиц для одного и того же гравитационного поля не совпадают.

В двузнаковой гравитации и в гравидинамике считается, что не обычные формы материи, а вакуумная материя является главным фактором, определяющим динамику Вселенной. В следующей главе даётся пояснение этого основополагающего утверждения этих теорий гравитации.

# ГЛАВА 3
# ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВАКУУМА

*Мысль Эйнштейна ясна. Согласно ОТО, пространство-время само есть среда. Отказаться от эфира значит предположить, что пустое пространство не обладает никакими физическими свойствами. ОТО не только возвращает динамические свойства пустому пространству, но также приписывает ему энергию, импульс и момент количества движения.*

**Б. С. де Витт** [20]

## 3.1. Вакуум-пространство-время

В двузнаковой гравитации вакуум является непрерывной, идеальной, сжимаемой средой, состоящей из вакуумной материи. Физические свойства вакуума и геометрические свойства пространства-времени неразрывно связаны. Пространство-время – это геометрическая, а вакуум – материальная составляющая единого физического объекта «вакуум-пространство-время». Искривление пространства-времени связано с деформацией и поляризацией вакуума.

Реальные частицы и античастицы являются возмущёнными состояниями вакуума. Частицы соответствуют состояниям с положительной энергией, античастицы – состояниям с отрицательной энергией.

Вакуумная материя состоит из виртуальных частиц и античастиц и является квантовым объектом. Квантовые эффекты проявляются в ней на пространственно-временны́х масштабах:

$$l \leqslant l_\hbar = \hbar/mc,\ t \leqslant t_\hbar = \hbar/m\,c^2, \tag{3.1}$$

где $\hbar$ – постоянная Планка, $m$ – масса электрона, $c$ – скорость света, $l_\hbar \approx 3{,}87 \cdot 10^{-11}$ см, $t_\hbar \approx 1{,}3 \cdot 10^{-21}$ с.

Концентрация виртуальных частиц/античастиц

$$n_\hbar \simeq l_\hbar^{-3} = (\hbar/mc)^{-3}. \tag{3.2}$$

Соответствующие им плотности энергий (гравитационных зарядов) вакуумных материй и антиматерий

$$\varepsilon_{+} \simeq m\,c^2 n_{\hbar}, \quad \varepsilon_{-} \simeq -m\,c^2 n_{\hbar} \tag{3.3}$$

значительно больше, чем средняя плотность энергии обычной материи во Вселенной.

Приведена упрощённая оценка параметров вакуума. Предполагается, что он состоит из виртуальных электронно-позитронных пар. Цель оценки лишь в одном: показать, что не обычная, а вакуумная материя является главной компонентой космической среды.

В вакууме содержится подавляющая часть энергии частиц и античастиц космической среды. На масштабах, значительно бо́льших, чем $l_{\hbar}$, вакуумная материя является однородной во всех частях Вселенной, за исключением, возможно, лишь областей экстремальных параметров барионной компоненты (окрестности нейтронных звёзд и других релятивистских объектов). Средняя плотность энергии (гравитационного заряда) и электрического заряда вакуума, на масштабах, много бо́льших $l_{\hbar}$, равна нулю.

Если вместо массы электрона в формулах (3.1)–(3.3) подставить массу протона, то соответствующие оценки будут определять параметры вакуума на пространственно-временных масштабах $l \lesssim 10^{-14}$ см, $t \lesssim 10^{-24}$ с.

Согласно двузнаковой гравитации обычная материя является малым возмущением электро- и гравитационно-нейтрального вакуума, однородно заполняющего Вселенную. В то же время в этой теории именно обычная материя, с существующим в ней регулярным механизмом разделения её на миры и антимиры, является первичным источником макроскопических гравитационных полей во Вселенной.

В этом параграфе опишем на качественном уровне, пренебрегая влиянием обычной материи, геометрические и физические свойства вакуума-пространства-времени на масштабах $l \gg l_{\hbar}$ и $t \gg l_{\hbar}$. Описание проведём в приближении механики сплошной среды. Считается, что объект вакуум-пространство-время является безграничной идеальной средой, однородно заполняющей Вселенную.

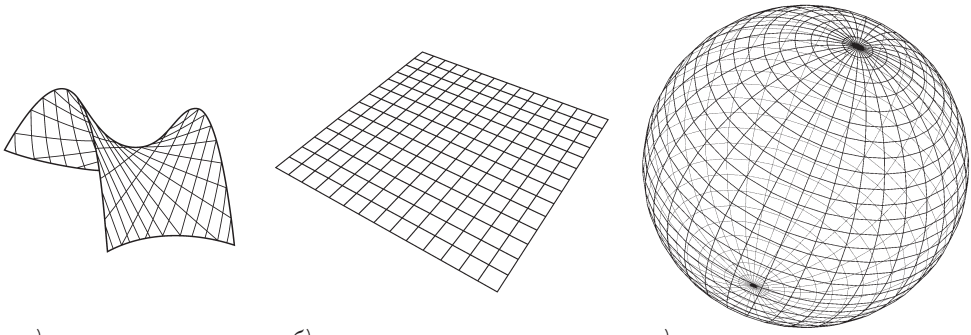
## 3.2. Геометрические свойства однородного Вакуума

В двузнаковой гравитации геометрические свойства однородного безграничного вакуума (далее обозначаемого с прописной буквы) определяют геометрические свойства Вселенной на космологических масштабах. На этих масштабах Вселенная является безграничной, однородной и изотропной.

Изучая геометрию Вакуума, его трёхмерное пространство удобно рассматривать как однородную изотропную и безграничную трёхмерную гиперповерхность в фиктивном четырёхмерном евклидовом пространстве [46]. Возможны три типа таких гиперповерхностей. Им соответствуют различные значения

некоторого параметра $k$, который может принимать три значения: $-1$, $0$, $+1$. При этих значениях реализуются случаи трёхмерных пространств отрицательной, нулевой и положительной кривизны соответственно. Величиной, описывающей геометрические свойства этих поверхностей, является их кривизна. В нестационарных однородных пространствах кривизна, оставаясь одинаковой во всех точках однородного трёхмерного пространства, изменяется во времени.

Пространства отрицательной ($k = -1$) и нулевой ($k = 0$) кривизны имеют бесконечный объём, а пространство положительной ($k = +1$) кривизны имеет конечный объём. Часто первое из этих пространств называют псевдосферическим, второе – плоским, а третье – сферическим [19; 27; 46]. Двумерные аналогии рассматриваемых трёхмерных однородных гиперповерхностей схематично изображены на рис. 3.1.



*а)* *б)* *в)*

*Рис. 3.1. Схематичное изображение однородных поверхностей отрицательной (а), нулевой (б) и положительной (в) кривизны*

Величиной, описывающей изменение геометрических размеров Вакуума, является его масштаб $a(t)$. Часто эту величину называют радиусом кривизны Вселенной [27; 46]. В силу однородности Вакуума радиус кривизны имеет одинаковое значение во всех его точках.

В реальной Вселенной существует обычная материя и неравномерности в её пространственном распределении. Они приводят к локальным нарушениям искривлённости вакуума-пространства-времени. Эти нарушения проявляются в виде локальных гравитационных полей. В данной главе нас интересуют геометрические и физические свойства вакуума-пространства-времени на космологических масштабах, и поэтому локальные гравитационные поля не рассматриваются.

Уравнения, описывающие в рамках двузнаковой гравитации изменение геометрических свойств Вакуума на космологических масштабах (космологические уравнения Фридмана), имеют вид (см. гл. 19)

$$3\left(\frac{\dot{a}^2}{a^2}+\frac{kc^2}{a^2}\right)=\Lambda c^2; \tag{3.4}$$

$$2\frac{\ddot{a}}{a}+\frac{\dot{a}^2}{a^2}+\frac{kc^2}{a^2}=\Lambda c^2. \tag{3.5}$$

Показано [36], что существует семь типов решений этих уравнений. Они описываются следующими функциями:

1) $a(t) = a_0 = \text{const}$, $\Lambda = 0$;
2) $a(t) = a_0 \exp(t/t_0)$, $t_0 = a_0/c$, $\Lambda = 3/a_0^2$;
3) $a(t) = a_0 \exp(-t/t_0)$, $\Lambda = 3/a_0^2$;
4) $a(t) = a_{\max}|\sin\,(t/t_1)|$, $t_1 = a_{\max}/c$, $\Lambda = -3/a_0^2$; (3.6)
5) $a(t) = |ct|$, $\Lambda = 0$;
6) $a(t) = a_2|\text{sh}\,(t/t_2)|$, $t_2 = a_2/c$, $\Lambda = 3/a_0^2$;
7) $a(t) = a_{\min}\text{ch}\,(t/t_3)$, $t_3 = a_{\min}/c$, $\Lambda = 3/a_0^2$.

Схематично графики этих решений приведены на рис. 3.2. Константа $\Lambda$ играет фундаментальную роль в теории и называется космологической постоянной [19; 27]. Она однозначно связана со скалярной кривизной пространства-времени $R_4$ ($\Lambda = -R_4/4$).

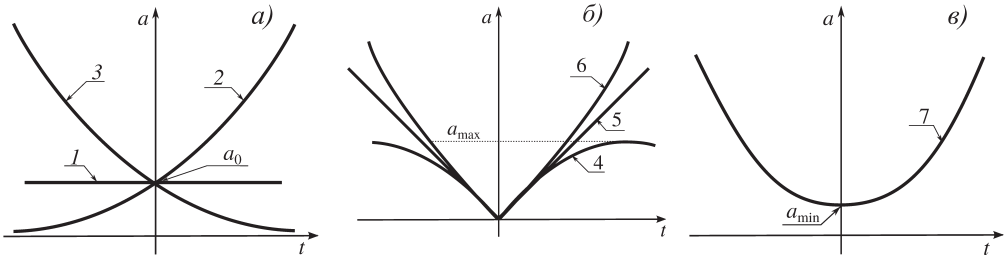



*Рис. 3.2. Схематичное изображение графиков, определяющих динамику плоских (k = 0) (а), псевдосферических (k = –1) (б) и сферических (k = +1) (в) трёхмерных пространств Вакуума* [36]

Согласно этим решениям теоретически возможно существование семи различных семейств однородных изотропных Вакуумов, отличающихся характером изменения во времени их радиусов кривизны, а также типами соответствующих им трёхмерных пространств. Возможны плоские $k = 0$, псевдосферические $k = -1$ и сферические $k = +1$ трёхмерные пространства Вакуума. В двузнаковой гравитации геометрические свойства Вакуума и соответствующих им идеализированных вселенных совпадают.

Решения с $\Lambda \neq 0$ можно интерпретировать как описывающее геометрические свойства вселенных, у которых скалярная кривизна четырёхмерного пространства-времени $R_4$ отлична от нуля и имеет постоянное значение. При этом космологическая постоянная $\Lambda = -R_4/4$. Решения с $\Lambda > 0$ обладают неприятной особенностью: при $t \to \infty$ имеет место экспоненциальный рост скорости расширения описываемых ими вселенных. Решения с $\Lambda < 0$ описывают осциллирующие вселенные.

Решение с $\Lambda = 0,\ k = 0$ описывает плоское стационарное пространство. Оно не представляет интереса, поскольку реальная Вселенная, как показывают наблюдения, не является стационарной, она расширяется (см. гл. 4).

Интересным, как мы считаем, является решение, для которого $\Lambda = 0,\ k = -1$. Оно описывает равномерное расширение псевдосферического трёхмерного пространства. Есть основание считать, что именно это решение и описывает геометрические свойства реальной Вселенной. Этот вопрос подробно обсуждается в гл. 17 и 18.

Решения 2)–7) (см. формулы (3.6)) можно рассматривать как описывающие глобальные нестационарные гравитационные поля теоретически возможных однородных изотропных вселенных. С геометрической точки зрения, эти поля связаны с искривлённостями двух типов: с кривизной четырёхмерного пространства-времени (если $\Lambda \neq 0$), а также с кривизной трёхмерного пространства (при $\Lambda = 0$ и $k = -1$). Эти искривлённости можно рассматривать как две вакуумные формы материи [34]. Покажем, что такая точка зрения допустима и является продуктивной.

## 3.3. Физические свойства Вакуума

В двузнаковой гравитации объект вакуум-пространство-время обладает не только геометрическими свойствами, но и физическими. Изменение масштаба Вакуума, описанное в предыдущем пункте, можно интерпретировать не только геометрически, но и как связанное с нестационарностью его физических параметров. Чтобы это пояснить, перепишем космологические уравнения Фридмана (3.4) и (3.5) в виде

$$3\left(\frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{0 \cdot c^2}{a^2}\right) = \frac{8\pi G}{c^2}\left(\varepsilon_N + \varepsilon_\Lambda\right); \tag{3.7}$$

$$2\frac{\ddot{a}}{a} + \frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{0 \cdot c^2}{a^2} = -\frac{8\pi G}{c^2}\left(P_N + P_\Lambda\right). \tag{3.8}$$

Формулы, определяющие величины $\varepsilon_N$, $\varepsilon_\Lambda$, $P_N$, $P_\Lambda$, представим далее.

Уравнения (3.7) и (3.8) описывают динамику физических свойств Вакуума в плоском трёхмерном пространстве. В этом описании кривизна четырёхмерного пространства-времени и кривизна трёхмерного пространства рассматриваются как величины, определяющие физические свойства двух видов вакуумных материй. Первой из них является тёмная энергия, её параметры определяются кривизной четырёхмерного пространства-времени. Вторая названа авторами [34] гравитационно-нейтральной вакуумной материей, её параметры определяются кривизной трёхмерного пространства Вакуума. Первая из этих материй хорошо известна в современной космологии. Введение гравитационно-нейтральной вакуумной материи и её интерпретация как физического вакуума позволяют по-иному, чем это принято сейчас, осознать смысл гравитации.

Тёмная энергия и гравитационно-нейтральная материя являются идеальными средами, а их термодинамические свойства описываются формулами

$$\varepsilon_\Lambda = \frac{c^4\Lambda}{8\pi G}, \quad P_\Lambda = -\varepsilon_\Lambda; \tag{3.9}$$

$$\varepsilon_N = \frac{3c^4}{8\pi G}\cdot\frac{1}{a^2}, \quad P_N = -\frac{1}{3}\varepsilon_N, \tag{3.10}$$

где $\varepsilon$ и $P$ – плотность энергии и давление этих сред, $c$ – скорость света, $G$ – гравитационная постоянная, $\Lambda$ – универсальная постоянная, называемая космологической постоянной. Значками $\Lambda$ и $N$ обозначаются величины, описывающие тёмную энергию и гравитационно-нейтральную вакуумную материю соответственно.

Космологическое ускорение $\ddot{a}$, с которым происходит расширение/сжатие Вселенной, однородно заполненной материей, плотность энергии которой $\varepsilon$, а давление $P$, определяется формулой [19; 27]

$$\ddot{a} = -\frac{4}{3}\pi G\frac{a}{c^2}\left(\varepsilon + 3P\right). \tag{3.11}$$

Применим формулу (3.11) для описания динамики Вакуума.

## 3.4. Тёмная энергия

Учитывая (3.9) и (3.11), заключаем, что Вакуум, состоящий из тёмной энергии, расширяется ускоренно. Соответствующее ускорение определяется формулой

$$\ddot{a}_\Lambda = \frac{1}{3}\Lambda c^2 a_\Lambda. \tag{3.12}$$

Тёмная энергия, для которой космологическая постоянная $\Lambda > 0$ ($\varepsilon_\Lambda > 0$, $P_\Lambda < 0$), оказывает «расталкивающее» влияние на пространство Вакуума. Это влияние тем больше, чем сильнее оно растянуто. Решения, описывающие динамику Вакуума, заполненного тёмной энергией с $\Lambda > 0$, изображены на рис. 3.2 (решения 2, 3, 6, 7). При $\Lambda > 0$ трёхмерное пространство Вакуума может быть как плоским, так и искривлённым. (Последнее может быть истолковано как присутствие в плоском пространстве, кроме тёмной энергии, ещё и другой вакуумной материи – гравитационно-нейтральной.) При расширении Вакуума, заполненного тёмной энергией с $\Lambda > 0$ при $t \to \infty$, имеет место экспоненциальный рост его масштаба.

В современной космологии считается, что в настоящее время пространство Вселенной сильно растянуто и более чем на 70 % заполнено тёмной энергией, у которой $\Lambda \approx 10^{-56}$ см$^{-2}$. Полагают, что в основном она и определяет глобальную динамику современной Вселенной. Считается, что со временем влияние тёмной энергии будет нарастать и Вселенная перейдёт в режим экспоненциального роста её масштаба [19; 70]. На наш взгляд, этот нефизичный теоретический результат указывает на необходимость уточнения существующей теории гравитации. Считаем, что для понимания природы тёмной энергии необходимо учитывать различие в гравитации частиц и античастиц, а также симметрию Вселенной по ним (см. гл. 20).

Наличие в Вакууме тёмной энергии с $\Lambda < 0$ ($\varepsilon_\Lambda < 0$, $P_\Lambda > 0$) придаёт пространству упругие свойства. В этом случае он ведёт себя подобно идеальной упругой пружине и совершает гармонические колебания (см. решения 4 на рис. 3.2). Тёмная энергия с $\Lambda < 0$ в современной космологии обычно не рассматривается, хотя такая вакуумная материя в теоретическом плане предпочтительнее тёмной энергии с $\Lambda > 0$. Она, по крайней мере, не приводит к безграничному росту скорости расширения Вакуума при $t \to \infty$.

## 3.5. Гравитационно-нейтральная вакуумная материя

При космологической постоянной, равной нулю, возможны два типа решений, описывающих динамику Вакуума (см. графики 1 и 5 на рис. 3.2). Решения 1 описывают стационарный Вакуум, расстояния между любыми точками которого остаются постоянными. Этот Вакуум является истинно пустым. Решения 5 описывают динамику Вакуума, заполненного гравитационно-нейтральной вакуумной материей. Её термодинамические свойства описываются формулами (3.10).

Как видно из (3.10) и (3.11), в отличие от тёмной энергии, гравитационно-нейтральная вакуумная материя не создаёт ускоренного космологического расширения Вакуума. Из (3.11) видно, что среда, для которой уравнение состояния имеет вид $P = -\frac{1}{3}\varepsilon$, является уникальной. В отличие от любых

других сред она не меняет скорости расширения Вакуума. Однородно распределённая гравитационно-нейтральная материя не искривляет четырёхмерного пространства-времени, но именно она и определяет скорость расширения трёхмерного пространства. Согласно двузнаковой гравитации масштаб Вакуума, заполненной гравитационно-нейтральной материей, увеличивается со скоростью света.

В рамках двузнаковой гравитации показано, что глобальную динамику Вселенной определяет гравитационно-нейтральная вакуумная материя, и при этом использовать тёмную энергию для интерпретации наблюдательных данных, для которых существенны космологические эффекты, нет необходимости. Более простой и естественный способ их объяснения связан с правильным учётом влияния гравитационно-нейтральной материи на динамику Вселенной. Эта возможность рассмотрена в гл. 18.

В рамках двузнаковой гравитации астрономические наблюдения могут быть объяснены без использования тёмной энергии. Имеются также и веские теоретические соображения, указывающие на целесообразность теории, в которой $\Lambda \equiv 0$. Далее поясняется смысл этих соображений.

## 3.6. О проблеме космологической постоянной

В общей теории относительности существует проблема космологической постоянной. Если, следуя представлениям ОТО, вклады всех компонент космической среды в полную плотность энергии суммировать, то значение плотности энергии физического вакуума $\varepsilon_V$ на много порядков превысит плотность энергии $\varepsilon_\Lambda$ тёмной энергии.

Например, считая, что $\varepsilon_V = mc^2 \big/ \left(h/mc\right)^3$, $\varepsilon_\Lambda = c^4\Lambda/8\pi G$, то есть учитывая лишь электронно-позитронный вклад в плотность энергии вакуума и полагая $\Lambda = 10^{-56}$ см$^{-2}$, как это считается в современной космологии, находим $\varepsilon_V/\varepsilon_\Lambda \sim 10^{31}$ [26; 28].

В современной физической теории считают, что вследствие огромного различия в плотностях энергий $\varepsilon_V$ и $\varepsilon_\Lambda$, физический вакуум – это одно, а тёмная энергия – другое. При этом остаётся совершенно непонятным, почему в гравитации физический вакуум, имеющий огромную плотность энергии, не проявляется, а тёмная энергия, имеющая несравненно меньшую плотность энергии, является главным фактором, определяющим динамику современной Вселенной?

В двузнаковой гравитации эта проблема естественным образом решается. Учитывается, что физический вакуум состоит из виртуальных частиц и античастиц, а их вклады в тензор энергии-импульса, являющийся источником гравитационного поля, не складываются, а вычитаются. Считается, что физический вакуум является симметричным по виртуальным частицам и анти-

частицам, а их огромные вклады в то, что описывается Λ-членом Эйнштейна, сокращаются, и космологическая постоянная оказывается равной нулю. В этой теории физический вакуум не только электро-, но и гравитационно-нейтрален.

В двузнаковой гравитации предположение о том, что $\Lambda \approx 10^{-56}$ см$^{-2}$, означает существование различия в концентрациях виртуальных частиц и античастиц в физическом вакууме на уровне меньшем, чем $10^{-31}$. Как будет показано в гл. 18, предполагать даже столь малые нарушения гравитационной нейтральности физического вакуума нет необходимости. Теория хорошо объясняет наблюдаемую динамику Вселенной и в предположении $\Lambda = 0$. В двузнаковой гравитации предполагать наличие гравитационного заряда у Вселенной столь же неестественно, как и наличие у неё полного электрического заряда, отличного от нуля.

## 3.7. Проявления Вакуума

В двузнаковой гравитации Вакуум в целом является электро- и гравитационно-нейтральным. Это не означает, что таковым он является на любых масштабах. В реальности существуют нарушения гравитационной нейтральности Вакуума на различных масштабах, и они связаны с наличием в нём частиц и античастиц. Эти нарушения должны проявляться в наблюдениях. Обратим внимание лишь на некоторые из них.

Вакуум обладает огромной плотностью виртуальных частиц и античастиц, постоянно рождающихся и уничтожающихся. От него нельзя заэкранироваться. Он является квантовым объектом, неразрывно связанным с пространством и временем. Влияние Вакуума на реальные частицы и античастицы явно проявляется, когда меняется скорость или направление их движения в нём. Согласно двузнаковой гравитации это влияние проявляется в виде сил инерции, действующих на частицы и античастицы (гл. 22).

Гравитационно-нейтральный Вакуум, как и реликтовое излучение, выделяет привилегированную систему отсчёта. С учётом этого (см. гл. 21) показано, что эффекты специальной теории относительности следует рассматривать не как кинематические, а как динамические, обусловленные влиянием Вакуума на частицы и античастицы. Показано, что, вследствие движения Солнечной системы в Вакууме со скоростью приблизительно 390 км/с в направлении созвездия Девы, должна наблюдаться анизотропия массы и времени жизни релятивистских частиц/античастиц на уровне 0,13 % от их декларируемых значений.

В гл. 27 показано, что влияние Вакуума может привести к кардинальному изменению свойств гравитационных полей на галактических масштабах. Идея о влиянии Вакуума на гравитационные поля является альтернативой идее о существовании тёмной материи.

# ГЛАВА 4

# ДИНАМИКА ВСЕЛЕННОЙ

*Пространство Фридмана – Лобачевского может, самое большое, служить фоном для ограниченного числа галактик, подобно тому, как галилеево пространство служит фоном для объектов, подобных Солнечной системе. Сама применимость уравнений Эйнштейна в их классическом виде к таким огромным пространствам не является столь бесспорной, как их применимость в более ограниченных масштабах. Не исключено, что для космологических масштабов эти уравнения потребуют изменения или обобщения.*

**В. А. Фок** [66]

В настоящей главе приведено качественное описание наблюдаемой динамики Вселенной. Показано, что она значительно проще и убедительнее объясняется в рамках двузнаковой гравитации, чем в общей теории относительности.

## 4.1. Однородность и изотропность Вселенной

Существование во Вселенной различных объектов (планет, звёзд, галактик и многих других) указывает на разнообразие и сложность протекающих в ней процессов. При изучении глобальной динамики Вселенной учитываются её наиболее важные свойства: состав космической среды, её пространственное распределение, а также силы, которые определяют её движение.

Структурными элементами Вселенной, удобными для изучения распределения материи и её динамики на космологических масштабах, являются галактики. Галактики – гравитационно-связанные образования, состоящие из огромного количества звёзд, облаков плазмы и газопылевой материи. Их размеры достигают сотен килопарсек [24]. Парсек (пк) – единица длины, применяемая в астрономии. С расстояния в 1 пк большая полуось орбиты Земли будет видна под углом в одну угловую секунду. Обычно в космологии используется более крупная единица длины мегапарсек (1 Мпк = $10^6$ пк $\simeq 3{,}1 \cdot 10^{24}$ см).

При изучении динамики Вселенной галактики рассматривают как материальные точки. Наблюдаемое пространственное распределение галактик, а также распределение скоростей их относительного движения позволяют судить о глобальных свойствах Вселенной.

Галактики образуют группы и скопления, содержащие десятки, сотни и тысячи членов. Скопления галактик имеют характерные размеры $\lesssim 2$–3 Мпк. Наблюдения показывают, что распределение скоплений галактик на масштабах $\gtrsim 100$ Мпк является почти однородным. С учётом этого в космологии считается, что Вселенная на масштабах, превышающих 100–300 Мпк, является однородной [19; 27].

Из наблюдений следует, что на таких масштабах Вселенная является не только однородной, но и изотропной. На небесной сфере нет выделенных направлений, в которых распределение наблюдаемых объектов отличалось бы от других. Однородность и изотропность распределения материи на космологических масштабах являются одним из фундаментальных свойств Вселенной.

Предположение об однородности и изотропности Вселенной лежит в основе её современной космологической модели [19; 27; 70].

## 4.2. Хаббловское расширение Вселенной

Кроме глобальной однородности и изотропности, другим фундаментальным свойством Вселенной является её нестационарность. В период между 1910 и 1920 г. В. Слайфер обнаружил, что спектральные линии наблюдаемых галактик слегка сдвинуты в красную или голубую сторону. Эти сдвиги были интерпретированы как обусловленные эффектом Доплера. Это означает, что галактики, спектры которых изучали, двигались либо к Земле, либо от Земли. Дальнейшие исследования показали, что за исключением лишь некоторых близких к нам галактик все другие удаляются от нас. При этом чем дальше находятся наблюдаемые галактики, тем с большей скоростью они удаляются.

Космологический принцип требует, чтобы расширение сопутствующей системы отсчёта происходило одинаково по отношению к любому типичному наблюдателю.

В 1929 г. Хаббл объявил об открытии закона, согласно которому скорости удаления галактик растут пропорционально расстоянию до них. Дальнейшие исследования лучевых скоростей, с которыми удаляются не слишком далекие галактики, находящиеся на расстоянии $R$, подтвердили закон Хаббла:

$$\frac{dR}{dt} = H(t)R, \tag{4.1}$$

где $H(t)$ – параметр Хаббла. Современное значение параметра Хаббла $H(t_0) = H_0$ называется постоянной Хаббла [11; 12; 24].

Лучевые скорости движения видимых объектов во Вселенной измеряются с использованием эффекта Доплера с высокой степенью точности. Ошибки

в определении постоянной Хаббла связаны в основном с погрешностью измерения расстояний. Типичная хаббловская диаграмма приведена на рис. 4.1.

В расширяющейся Вселенной длина волны $\lambda$ фотона, испущенного в момент времени $t$, и его длина волны $\lambda_0$, регистрируемая наблюдателем в момент времени $t_0$, связаны соотношением

$$\lambda_0/\lambda = (a_0/a). \qquad (4.2)$$

Величины $a$ и $a_0$ определяют масштаб Вселенной в момент времени $t$ и $t_0$ соответственно.

Красное смещение наблюдаемого объекта определяется формулой

$$z = (\lambda_0 - \lambda)/\ \lambda = (a_0/a) - 1. \qquad (4.3)$$

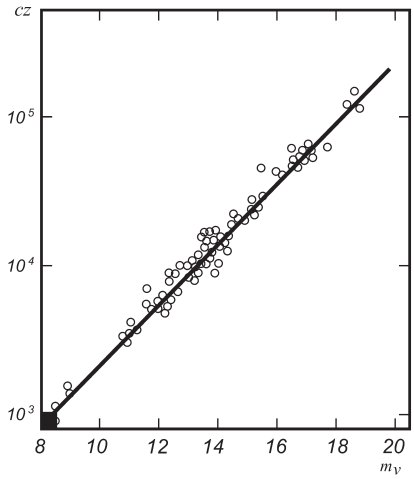



*Рис. 4.1. Зависимость «видимая звёздная величина – красное смещение» для ярчайших галактик скоплений согласно работе [103]. В левом нижнем углу диаграммы изображён чёрный прямоугольник. Он соответствует области данных, которыми располагал Хаббл в 1929 г., когда открыл свой закон*

Чем дальше находился объект, излучивший фотоны, тем больше отношение $a_0/a(t)$ и тем больше его красное смещение $z$ $(a_0/a = 1 + z)$ [27].

Красное смещение $z$ объекта – непосредственно измеряемая величина, по крайней мере для эпох, когда во Вселенной уже могли существовать атомы и когда длина свободного пробега фотонов стала достаточно большой [19; 27]. Измерение $z$ сводится к идентификации линий или системы линий излучения (или поглощения) атомов и определению того, насколько они смещены в область длинных волн. Для однородной изотропной Вселенной формулы (4.2) и (4.3) имеют общий характер и справедливы при любых $z$. Красное смещение $z$ является удобной величиной для определения эпох эволюции Вселенной.

Закон Хаббла (4.1) для галактик, имеющих $z << 1$, имеет вид

$$z = H_0R/c = V/c, \qquad (4.4)$$

где $R$ – расстояние до галактики, $V$ – скорость её удаления, $c$ – скорость света, $H_0$ – постоянная Хаббла, не зависящая ни от $R$, ни от направления на галактику [19; 27].

В космологии исследуется зависимость «красное смещение $z$ звёздная величина $m$ для “стандартных свеч”» [56]. (Стандартные свечи – астрономические

объекты, предположительно имеющие определённую абсолютную светимость.) Обычно для проверки закона Хаббла строится зависимость между красным смещением $z$ скоплений галактик и блеском ярчайшей галактики скопления $m$. Оставляя в стороне технические детали, отметим только, что эта чрезвычайно трудная задача решена. Используется метод определения расстояний до всё более и более далёких объектов и, наконец, до скопления, в котором находится ярчайшая галактика (рис 4.2) [11; 12].

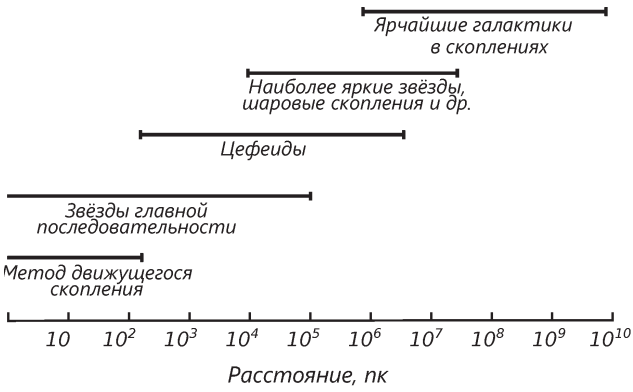



*Рис. 4.2. «Лестница» различных методов определения космических расстояний. Каждая черта указывает диапазон расстояний, которые могут быть измерены данным методом (по С. Вайнбергу* [12])

Очевидно, что на каждой ступени «лестницы» различных методов определения расстояний до всё более далёких объектов возможны ошибки, поэтому постоянная Хаббла $H_0$ считается известной даже сейчас с точностью, вряд ли лучшей чем 5–10 %.

Хаббловское распределение по скоростям в расширяющейся Вселенной является единственным, которое совместимо с космологическим принципом её однородности и изотропности. Только в случае выполнения закона Хаббла (4.1) для любого типичного наблюдателя однородность и изотропность Вселенной будет сохраняться в процессе её расширения [27].

Из обработки огромных массивов наблюдательных данных о взаимосвязи лучевых скоростей далёких галактик и расстояний до них было найдено [103], что $H_0 = 65 \pm 5$ км/(с · Мпк). Постоянную Хаббла обычно записывают в виде $H_0 = h \cdot 100$ км/(с · Мпк).

Хаббловское расширение Вселенной вовсе не означает, что, по Хабблу, расширяются все её объекты. В современной космологии считается, что согласно этому закону изменяются размеры лишь достаточно больших объёмов пространства, и они значительно больше, чем характерный объём скоплений галактик [19; 27]. Возможно, что это не так, и закон Хаббла выполняется начиная с расстояний $\gtrsim$ 2–10 Мпк [70; 103].

## 4.3. Космологические уравнения Фридмана

Ещё недавно считали, что глобальную динамику Вселенной определяют лишь силы гравитации. В однородной изотропной Вселенной нет перепадов давления и нет её вращения как целого, вследствие этого на космологических масштабах нет ни сил давления, ни центробежных сил, которые могли бы противодействовать тяготению. С учётом этого считали, что расширение Вселенной происходит с замедлением. Что касается причин возникновения расширения, то полагали, что оно является следствием начальных условий, природа которых неясна [27; 46].

Известно, что описание динамики Вселенной в рамках ньютоновской теории гравитации является внутренне противоречивым [27]. После создания Эйнштейном релятивистской теории гравитации (ОТО) стали считать, что появилась возможность ставить и решать задачу описания динамики Вселенной в целом [73].

Описание динамики Вселенной в рамках ОТО основано на решениях уравнений Эйнштейна, в правую «материальную» часть которых подставляется тензор энергии-импульса всех компонент материи мира [19; 27].

Обычно рассматривается космологическая модель Вселенной, в которой делаются следующие предположения.

- Вселенная является однородной, изотропной, безграничной и нестационарной.
- Космическая среда рассматривается как сплошная, идеальная, однородная материя, непрерывно заполняющая Вселенную. Её термодинамическими параметрами является плотность энергии $\varepsilon$ и давление $P$. Они связаны уравнением состояния $P = f(\varepsilon)$. Вид этого уравнения определяется составом и физическими свойствами компонент космической среды. Вклады всех её компонент в $\varepsilon$ и $P$ суммируются.
- Описание динамики Вселенной проводится в сопутствующей системе отчёта, в которую космическая среда «вморожена». В этой системе отчёта имеет место глобальное расщепление 4-мерного искривлённого пространства-времени на 3-мерное пространство и ортогональное ему время (собственное время) [14].
- Описывая динамику Вселенной, её пространство рассматривают как однородную изотропную трёхмерную гиперповерхность. Возможны три типа таких гиперповерхностей. Им соответствуют различные значения некоторого параметра $k$, которые могут быть равными: –1, 0, +1. При этих значениях реализуются трёхмерные пространства отрицательной, нулевой и положительной кривизны соответственно (см. гл. 3). Величиной, определяющей кривизну $R_3$ этих пространств, является скалярная величина $a$ ($R_3 = 3k/a^2$), одинаковая во всех точках пространства и являющаяся функцией лишь собственного времени.

В космологии эту величину называют масштабным фактором Вселенной, или просто её масштабом, или радиусом её кривизны [19; 27; 46].

В однородной изотропной Вселенной величиной, характеризующей её динамику, является радиус кривизны $a$. Уравнениями, описывающими изменение во времени радиуса кривизны $a(t)$, являются космологические уравнения Фридмана. Эти уравнения – следствие уравнений Эйнштейна в предположении однородности и изотропности Вселенной. Они были получены А. А. Фридманом в 1922–1924 гг. и лежат в основе современной космологии. Подробно космологические уравнения Фридмана обсуждаются в гл. 12.

Из космологических уравнений Фридмана следует, что для Вселенной, заполненной однородной космической средой, плотность энергии которой $\varepsilon$, а давление $P$, изменение её масштаба описывается уравнением (см. гл. 2) [27]

$$\ddot{a} = \frac{d^2 a}{dt^2} = -\frac{4}{3} \cdot \frac{\pi G}{c^2} \left( \varepsilon + 3P \right) a \,. \tag{4.5}$$

Это уравнение определяет космологическое ускорение, с которым происходит расширение Вселенной. Чтобы решать это уравнение, необходимо знать каким является состав космической среды и как при изменении масштаба Вселенной меняется плотность энергии и давление каждой из её компонент.

Для того чтобы в рамках уравнений Фридмана стало возможным интерпретировать наблюдения, для которых существенными являются космологическое расширение Вселенной, в современной космологии делаются определённые предположения о компонентном составе космической среды. Частично они основаны на прямых наблюдательных данных и, безусловно, являются правильными, но в значительной степени эти предположения гипотетичны. Введение в теорию гипотетических компонент космической среды (тёмной материи и тёмной энергии) обусловлено невозможностью без них в рамках ОТО объяснить наблюдения [19; 70].

Приведём краткие сведения о широко распространённом в космологии представлении о составе космической среды современной Вселенной.

## 4.4. Обычные формы материи

Звёзды в галактиках, облака горячего газа в галактиках и в межгалактическом пространстве являются главными составляющими видимой компоненты космической среды. Она состоит из протонов, ядер и электронов и называется барионной компонентой. Согласно астрономическим наблюдениям, а также существующим представлениям о составе космической среды вклад барионной компоненты в полную плотность энергии составляет примерно 4 % [18; 19; 70].

Значительно больший вклад в полную плотность энергии космической среды даёт тёмная материя. Эта компонента космической среды непосредственно не наблюдается. В то же время считается, что без предположения о её существовании в рамках ОТО невозможно правильно описать наблюдаемую динамику галактик и их скоплений. Чтобы это стало возможным, предполагают, что в них присутствует невидимая компонента космической среды в количестве, в 5–6 раз превышающем количество барионной компоненты [19; 24; 27]. Распределение тёмной материи на масштабах галактик и их скоплений не является однородным. Этой материи много на периферии и мало в центрах галактик и их скоплений. Вклад тёмной материи в полную плотность энергии космической среды оценивается на уровне 23 %. Установление её природы является одной из фундаментальных проблем современной физики [18; 19;].

В 1965 г. Пензиасом и Вилсоном открыто микроволновое электромагнитное излучение, принимаемое со всех направлений. Это открытие является одним из фундаментальных в космологии. Всесторонние исследования этого излучения, названного реликтовым, убедительно доказали, что Вселенная однородно заполнена чернотельным планковским излучением, имеющим температуру приблизительно 2,7 К. С учётом свойств этого излучения, а также наблюдательных данных о барионной компоненте материи доказан следующий важный факт: полное количество фотонов во Вселенной $N_\gamma$ приблизительно в $10^9$ раз больше, чем количество в ней барионов $N_B$ [19; 27]. Параметр $\eta_B = N_B / N_\gamma \sim 10^{-9}$, определяющий барион/фотонное соотношение во Вселенной, является одним из важнейших в космологии. Считается, что температура реликтового излучения в ходе космологического расширения Вселенной падала как $a^{-1}$, где $a$ – её масштабный фактор. Наблюдаемое равновесное излучение представляет собой реликт, оставшийся от ранних эпох эволюции Вселенной.

Есть основания предполагать, что в ранней Вселенной космическая среда имела высокую температуру и все её компоненты находились в локальном термодинамическом равновесии. Считается, что ранняя Вселенная была горячей и плотной и её начало связано с горячим Большим взрывом.

По мере расширения и остывания космической среды происходил «отрыв» её отдельных компонент от других. В современной космологии считается [18; 19], что первой выделилась тёмная материя, и это произошло в эпоху $z \simeq 10^{12}–10^{13}$. В эпоху $z \simeq 10^{10}$ произошёл отрыв нейтринной компоненты. Отрыв излучения от барионной компоненты имел место в эпоху $z \simeq 10^3$. Условия выхода компонент космической среды из кинетического равновесия друг с другом определяются характером их взаимодействия. Условия отрыва нейтринной и фотонной компонент от барионной компоненты рассчитываются достаточно точно, что касается условий отрыва тёмной материи, то здесь пока существует значительная неопределённость, и она связана с отсутствием реальных знаний о природе этой компоненты.

Реликтовое излучение и нейтринная компонента космической среды составляют её релятивистскую компоненту. Современная температура нейтринной компоненты приблизительно равна 2 К. Считается, что её вклад в полную плотность энергии составляет приблизительно 0,68 от вклада реликтового излучения [18; 19]. Вклад релятивистской компоненты космической среды, состоящей из реликтового излучения и нейтринной компоненты, в полную плотность энергии современной Вселенной значительно меньше (в тысячи раз), чем вклад барионной компоненты.

С учётом вышеизложенного вклад всех компонент обычной материи (барионной компоненты – 4 %, тёмной материи – 23 %, релятивистской компоненты – $4 \cdot 10^{-2}$ %) в полную плотность космической среды составляет приблизительно 27 %. Чем же тогда является то, что обеспечивает наличие во Вселенной ещё приблизительно 73 % энергии?

## 4.5. Эйнштейновские силы отталкивания

В настоящее время считается, что динамику Вселенной определяют не только силы тяготения, но и в не меньшей степени силы отталкивания. По-видимому, первым чётким указанием на это были наблюдательные данные о зависимости между видимой яркостью $E$ и красным смещением $z$ для сверхновых типа $Ia$ [97; 100]. В реальности рассматривается зависимость $m(z)$. По определению

$$m(z) = -2{,}5 \cdot \lg E(z) + \text{const}.$$

Подробно эта зависимость будет обсуждаться в гл. 18. Сверхновые типа $Ia$ имеют огромную и предположительно определённую абсолютную светимость в максимуме блеска, могут быть видны на огромных расстояниях, вплоть до $z \simeq 2$. Это означает, что принимаемое сейчас от них излучение было порождено ещё в эпоху, когда масштаб Вселенной был в 2–3 раза меньше современного. Это излучение очень долго распространялось в расширяющейся Вселенной (например, для сверхновых с $z = 1$ около 7 млрд лет). В случае немалых $z$ фотометрическое расстояние до излучающего объекта заметным образом зависит от закона изменения масштаба Вселенной $a(t)$. Расчёты показали, что если предположить, что расширение Вселенной последние 6–7 млрд лет происходило с замедлением, то невозможно объяснить наблюдаемую зависимость видимой звёздной величины $m$ сверхновых типа $Ia$ от красного смещения $z$ (точнее зависимость $(m - M)(z)$, где $M$ соответствует $m$ при условии, что источник находится на расстоянии 10 пк от наблюдателя).

Было показано, что для объяснения наблюдаемой зависимости $(m - M)(z)$ для сверхновых типа $Ia$ в рамках ОТО необходимо считать, что расширение

Вселенной последние 6–7 млрд лет происходило с ускорением. Следовательно, в это время, кроме сил тяготения, во Вселенной действовали силы отталкивания и их влияние было бóльшим, чем сил притяжения.

Наблюдаемую зависимость $(m - M)(z)$ нельзя объяснить, если предполагать, что ОТО является правильной теорией, а Вселенная заполнена лишь обычными формами материи, описанными в предыдущем пункте. Вклады всех компонент этой материи (барионной компоненты, тёмной материи и релятивистской компоненты) в полную плотность энергии $\varepsilon$ и давление $P$ являются положительными. При этом, согласно ОТО (см. формулу (4.5)), космологическое ускорение отрицательно и, следовательно, Вселенная расширяется с замедлением.

В современной космологии не предполагают неточность общей теории относительности, но чтобы объяснить наблюдаемую зависимость $(m - M)(z)$, считают, что кроме обычных форм материи, для которых $\varepsilon > 0$ и $P > 0$, во Вселенной существуют и другие необычные материи, для которых $\varepsilon > 0$, но $P < 0$ (среды с отрицательным давлением), которые и являются источником космологических сил отталкивания [19; 70].

О возможности описания в рамках общей теории относительности космологических сил отталкивания известно давно. Ещё в 1917 г. Эйнштейн, применяя ОТО для описания Вселенной, понял, что если считать источником сил, определяющих её динамику, обычные массы, однородно заполняющие пространство, то они создают лишь притяжение друг к другу, и получить разумное, как ему казалось, стационарное решение, описывающее Вселенную, невозможно [73]. Чтобы получить такое решение для однородной безграничной космической среды, Эйнштейн, не нарушая основополагающих идей ОТО, ввёл в уравнения для гравитационного поля дополнительное слагаемое, так называемый $\Lambda$-член. Это слагаемое имеет предельно простой вид и зависит лишь от одной универсальной константы $\Lambda$, называемой космологической постоянной. Оно может описывать силы отталкивания между любыми частицами Вселенной. Эти силы пропорциональны величине космологической постоянной $\Lambda$ и линейно растут с увеличением расстояния между частицами. Наличие этих сил Эйнштейн связывал с существованием постоянной и неустранимой кривизны четырёхмерного пространства-времени. Эйнштейновские уравнения с $\Lambda$-членом, а также смысл последнего подробно обсуждаются во второй части книги.

Наблюдения последних двух десятилетий (не только зависимости $(m - M)(z)$ для сверхновых типа *Ia*, но и некоторых других) убедительно показывают, что динамику Вселенной определяют не только силы тяготения, но и в не меньшей степени силы отталкивания. В настоящее время значительная часть космологов считает, что ими как раз и являются эйнштейновские силы отталкивания, описываемые $\Lambda$-членом [19; 70; 77; 101].

Космологическая постоянная $\Lambda$ определяется скалярной кривизной $R_4$ четырёхмерного пространства-времени ($\Lambda = -R_4/4$) (см. гл. 19). В гл. 20

показано, что неустранимую кривизну пространства-времени Вселенной можно трактовать как некоторую необычную вакуумную материю и считать, что она и является источником эйнштейновских сил отталкивания. Эту материю обычно называют тёмной энергией. Λ-член в уравнениях ОТО даёт описание её влияния на гравитацию.

Согласно материальной трактовке, тёмная энергия является идеальной средой. Её термодинамические свойства определяются формулами

$$\rho_\Lambda = \Lambda c^2 / 8\pi G, \quad P_\Lambda = -\varepsilon_\Lambda = -\rho_\Lambda c^2, \tag{4.6}$$

где $\rho_\Lambda$, $P_\Lambda$ – плотность и давление тёмной энергии. Тёмная энергия обладает уникальными свойствами. Она является однородной изотропной средой. Её параметры $\varepsilon_\Lambda$ и $P_\Lambda$ не меняются в процессе расширения Вселенной и одинаковы во всех локально-инерциальных системах отсчёта (см. п. 20.4).

В современной физике, чтобы согласовать теорию и наблюдения, полагают, что значение космологической постоянной $\Lambda \approx 10^{-56}$ см$^{-2}$ [19; 27; 70]. При этом, согласно (4.6), $\varepsilon_\Lambda > 0$, $P_\Lambda < 0$. Это означает, что тёмная энергия является средой с отрицательным давлением. В этом её кардинальное отличие от обычных форм материи.

Учитывая (4.5) и (4.6), заключают, что космологическое ускорение $\ddot{a}_\Lambda$, обусловленное тёмной энергией, определяется формулой

$$\ddot{a}_\Lambda = \frac{1}{3}\Lambda c^2 a_\Lambda. \tag{4.7}$$

При $\Lambda > 0$, $\ddot{a}_\Lambda > 0$. Это означает, что тёмная энергия с $\Lambda > 0$ является источником сил отталкивания. При $\Lambda \approx 10^{-56}$ см$^{-2}$ вклад тёмной энергии в современную полную плотность энергии составляет приблизительно 73 %. Остальные 27 % связаны с вкладом обычных форм материи (см. п. 4.4).

## 4.6. Стандартная космологическая модель

Современная космологическая модель, описывающая динамику Вселенной, основана на уравнениях Эйнштейна с Λ-членом. Она называется стандартной, её часто определяют как ΛCDM-модель. В этой модели считается, что космическая среда состоит из трёх компонент: нерелятивистской, релятивистской и тёмной энергии. Параметры этих компонент обычно обозначают значками $M$, $rad$, Λ соответственно [19]. Считается, что уравнения состояния этих компонент имеют вид

$$P_M = 0, \quad P_{rad} = \frac{1}{3}\varepsilon_{rad}, \quad P_\Lambda = -\varepsilon_\Lambda, \tag{4.8}$$

а их плотности энергий $\varepsilon_M = \rho_M c^2$, $\varepsilon_{rad} = \rho_{rad} c^2$, $\varepsilon_\Lambda = \rho_\Lambda c^2$ связаны с масштабом Вселенной $a(t)$ соотношениями

$$\varepsilon_M a^3 = \varepsilon_{M,0} a_0^3, \quad \varepsilon_{rad} a^4 = \varepsilon_{rad,0} a_0^4, \quad \varepsilon_\Lambda = \text{const}. \tag{4.9}$$

Значок нуля используется для обозначения параметров современной Вселенной. Считается, что нерелятивистская компонента содержит в себе барионную компоненту и тёмную материю.

Современные плотности компонент космической среды в ΛCDM-модели определяются безразмерными параметрами:

$$\Omega_M = \rho_{M,0}/\rho_c, \quad \Omega_{rad} = \rho_{rad,0}/\rho_c, \quad \Omega_\Lambda = \rho_\Lambda/\rho_c, \tag{4.10}$$

где $\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$, так называемая критическая плотность.

Согласно ΛCDM-модели пространство Вселенной является однородной изотропной трёхмерной гиперповерхностью. Параметр $k$, определяющий тип этой поверхности, может принимать три значения: –1, 0, +1. При $k = -1$ пространство Вселенной искривлённое и имеет бесконечный объем; при $k = 0$ оно плоское и безграничное; при $k = +1$ – замкнутое и имеет конечный объём.

Параметрами, определяющими эволюцию Вселенной в рамках ΛCDM-модели, являются

$$\Omega_M,\ \Omega_{rad},\ \Omega_{curv} = c^2/a_0^2 H_0^2,\ \Omega_\Lambda,\ H_0,\ k. \tag{4.11}$$

Практика использования ΛCDM-модели для интерпретации наблюдений привела к следующим выводам о значениях параметров (4.11) [19; 70; 77; 101]:

– пространственная кривизна Вселенной или точно равна нулю, или весьма мала ($k \cdot \Omega_{curv} < 0{,}02$);

– значение постоянной Хаббла $H_0 = (65 \pm 5)$ км/(с · Мпк);

– значения $\Omega_M = (0{,}27 \pm 0{,}03)$, $\Omega_\Lambda \simeq (0{,}73 \pm 0{,}03)$;

– значение $\Omega_{rad} \simeq 4{,}2 \cdot 10^{-5}/h$, $H_0 = h \cdot 100 \cdot$ км/(с · Мпк); $h \simeq 0{,}65 \pm 0{,}05$.

Приведённые значения, в существенной степени, являются не результатом прямых измерений, а следствием подгонки параметров ΛCDM-модели с целью наилучшего объяснения наблюдательных данных.

В ΛCDM-модели динамику Вселенной определяет влияние трёх компонент космической среды: релятивистской, нерелятивистской и тёмной энергии. В зависимости от того, влияние какой из них является главным, выделяют три эпохи её эволюции.

В эпоху доминирования радиации (*RD*-эпоха) главное влияние на динамику Вселенной имела релятивистская компонента.

Влияние нерелятивистской компоненты было главным в эпоху, которую часто называют пылевидной (CDM-эпоха, C – Cold, D – Dark, M – Matter).

В эпоху доминирования тёмной энергии главное влияние имеют космологические силы отталкивания (Λ-эпоха). Подробно ΛCDM-модель обсуждается в гл. 14.

Согласно расчётам в рамках ΛCDM-модели *RD*-эпоха продолжалась примерно 300–400 тыс. лет после Большого взрыва [19; 27]. В течение этой эпохи были приближённо справедливы следующие зависимости:

$$a(t) = \mathrm{const} \cdot t^{1/2},\ \varepsilon \sim P \sim T^4 \sim a^{-4}. \tag{4.12}$$

После *RD*-эпохи началась CDM-эпоха, продолжавшаяся приблизительно 6–7 млрд лет. В течение этой эпохи приближённо выполнялись зависимости

$$a(t) = \mathrm{const} \cdot t^{2/3},\ \varepsilon \sim P \sim a^{-3}. \tag{4.13}$$

Согласно ΛCDM-модели последние 6–7 млрд лет главное влияние на динамику Вселенной оказывает тёмная энергия и имеет место ускоренное расширение мира. В современной Вселенной космологические силы отталкивания в 5–6 раз больше, чем силы притяжения. Считается, что со временем влияние сил притяжения будет становиться всё меньшим, а влияние сил отталкивания всё большим, масштаб Вселенной будет расти по экспоненциальному закону.

Безграничное увеличение скорости расширения Вселенной при $t \to \infty$ и наличие в ней сингулярности при $t \to 0$ указывают на то, что ΛCDM-модель является, как мы полагаем, внутренне противоречивой, и это связано с ограниченностью ОТО.

ΛCDM-модель является эмпирической. Она содержит пять независимых параметров. Значения четырёх из них – $\Omega_M$, $\Omega_\Lambda$, $k$ и $\Omega_{curv}$ – пока не могут быть определены непосредственно из наблюдений и являются подгоночными. Не ясен физический смысл важнейших для этой модели компонент космической среды: тёмной материи и тёмной энергии.

В рамках ОТО не просматривается взаимосвязь тёмной энергии с физическим вакуумом. Это подробно обсуждается в гл. 20.

Возможно, что и идея о тёмной материи как о некоторой неизвестной компоненте комической среды является ложной. Альтернативное объяснение в рамках двузнаковой гравитации необычного поведения гравитационного поля на периферии галактик и их скоплений, как связанного с поляризацией вакуума, рассматривается в гл. 27.

Обсуждая результаты применения ΛCDM-модели, необходимо учитывать следующее. Выводы об ускоренном расширении современной Вселенной и о её «плоскостности» вовсе не следуют из прямых наблюдений, а являются лишь следствием применения ОТО с Λ-членом для объяснения наблюдений.

В следующем пункте приведено описание космологической модели Вселенной, основанной на двузнаковой гравитации.

## 4.7. Модель гравитационно-нейтральной Вселенной

В двузнаковой гравитации предполагается, что Вселенная симметрична по частицам и античастицам. Они имеют гравитационные заряды противоположных знаков, и между ними существует антитяготение. Считается, что главной компонентой космической среды во Вселенной является физический вакуум. Он однородно её заполняет. Вакуум не только электро-, но и гравитационно-нейтрален. Частицы и античастицы являются возмущёнными состояниями вакуума: частицы – состояниями с положительной энергией, а античастицы – состояниями с отрицательной энергией. Вселенная в целом является гравитационно-нейтральной.

Согласно двузнаковой гравитации на космологических масштабах гравитационно-нейтральная Вселенная является однородной и изотропной и в ней имеет место равновесие сил тяготения и антитяготения. Это означает, что на таких масштабах усреднённое гравитационное поле отсутствует. Глобальное трёхмерное пространство Вселенной является плоским и расширяется равномерно. Космологические уравнения Фридмана для гравитационно-нейтральной Вселенной имеют предельно простой вид:

$$\dot{a}^2 = c^2, \quad \ddot{a} = 0. \tag{4.14}$$

Из этих уравнений следует, что расстояние между любыми удалёнными точками в гравитационно-нейтральной Вселенной линейно растут во времени. Изменение масштаба $a(t)$ однородной гравитационно-нейтральной Вселенной описывается формулой

$$a(t) = ct, \tag{4.15}$$

где $c$ – скорость света, $t$ – время.

Космологическая модель Вселенной, описываемая уравнениями (4.14), в силу их простоты, названа авторами S-моделью (S – simple). Уравнение (4.15) не содержит свободных параметров. В этом уравнении скорость света определяет скорость роста размеров причинно-связанных областей во Вселенной. Подробно об S-модели и о её применении для объяснения наблюдений см. в гл. 17 и 18.

**Замечание**. Космологическая модель равномерно расширяющейся Вселенной впервые была предложена в работе [39]. Излагаемое в настоящей книге обоснование S-модели, как мы полагаем, является более убедительным.

Как видно из (4.15), в S-модели, как и в ΛCDM-модели, существовал момент времени ($t = 0$), когда размер Вселенной был нулевым. Его рассматривают как момент её рождения и определяют термином «Большой взрыв». В этот момент физические параметры космической среды были бесконечными. Считаем это недостатком как ΛCDM-, так и S-модели. Полагаем, что устранение сингулярностей из теории гравитации является одной из актуальных задач. Это кратко обсуждается в п. 19.5.

## 4.8. Динамика Вселенной согласно S-модели

Согласно S-модели во Вселенной на космологических масштабах имеет место точное равновесие сил притяжения и отталкивания, и вследствие этого она расширяется равномерно. Изменение масштаба Вселенной описывается формулой (4.15). Справедлив закон Хаббла

$$da/dt = aH(t). \tag{4.16}$$

Согласно S-модели параметр Хаббла $H(t) = t^{-1}$. Учитывая это, заключаем, что возраст Вселенной $t_0$ и постоянная Хаббла $H_0$ связаны соотношением

$$t_0 = H_0^{-1}. \tag{4.17}$$

При $H_0 \simeq 70$ км/(с · Мпк), $t_0 \simeq 14 \cdot 10^9$ лет, а при $H_0 \simeq 65$ км/(с · Мпк), $t_0 \simeq 15 \cdot 10^9$ лет. Эти оценки согласуются с современными данными о возрасте Вселенной.

Уравнения, определяющие изменение масштаба $a(t)$ в S- и ΛCDM-моделях, отличаются кардинально. В то же время уравнения, описывающие взаимосвязь масштаба $a(t)$ и параметров, определяющих термодинамические свойства космической среды, не зависят от вида функции $a(t)$ и в этих моделях одинаковы.

Температура излучения $T(t)$ и масштаб Вселенной $a(t)$ связаны соотношением

$$T(t) \cdot a(t) = T_0 \cdot a_0 = \text{const}. \tag{4.18}$$

Учитывая, что в S-модели $t_0 = H_0^{-1}$, $a(t) = \text{ct}$ из (4.18) находим

$$t = t_0(T_0/T). \tag{4.19}$$

Согласно современным данным $T_0 \simeq 2{,}725$ K, $t_0 \simeq 14 \cdot 10^9$ лет [2].

Используя формулу (4.19), можно в рамках S-модели определить датировку событий, имевших место в процессе эволюции Вселенной и происходивших

в известном интервале температур излучения. Используя формулы (4.3) и (4.18), можно определить красные смещения эпох, в которые эти события имели место.

Например, эпоха аннигиляции барионов и антибарионов имела место при $T \leqslant 3 \cdot 10^{12}$ К. Это, согласно (4.19), имело место при $t \geqslant 4{,}4 \cdot 10^5$ с после Большого взрыва. Соответствующее красное смещение $z \leqslant 10^{12}$.

Эпоха аннигиляции электрон-позитронных пар имела место при $T \leqslant 3 \cdot 10^9$. Это происходило при $t \geqslant 14$ лет после Большого взрыва. Соответствующие значения $z \leqslant 10^9$.

Переход барионной компоненты космической среды из состояния плазмы в газообразное состояние, определяемый в космологии термином «рекомбинация», имел место при $t \geqslant 14 \cdot 10^6$ лет после Большого взрыва, в эпоху $z \leqslant 10^3$.

На рис. 4.3 приведено сравнение датировок важнейших событий, рассчитанных в рамках S- и ΛCDM-моделей.

Основополагающие идеи S- и ΛCDM-моделей о факторах, определяющих динамику Вселенной, являются совершенно разными. Вследствие этого существует кардинальное отличие законов изменения масштаба Вселенной $a(t)$ в этих моделях. Это наглядно видно из рис. 4.3. Например, согласно S-модели длительность интервалов времён протекания «реперных» процессов в ранней Вселенной на много порядков больше, чем это предсказывается ΛCDM-

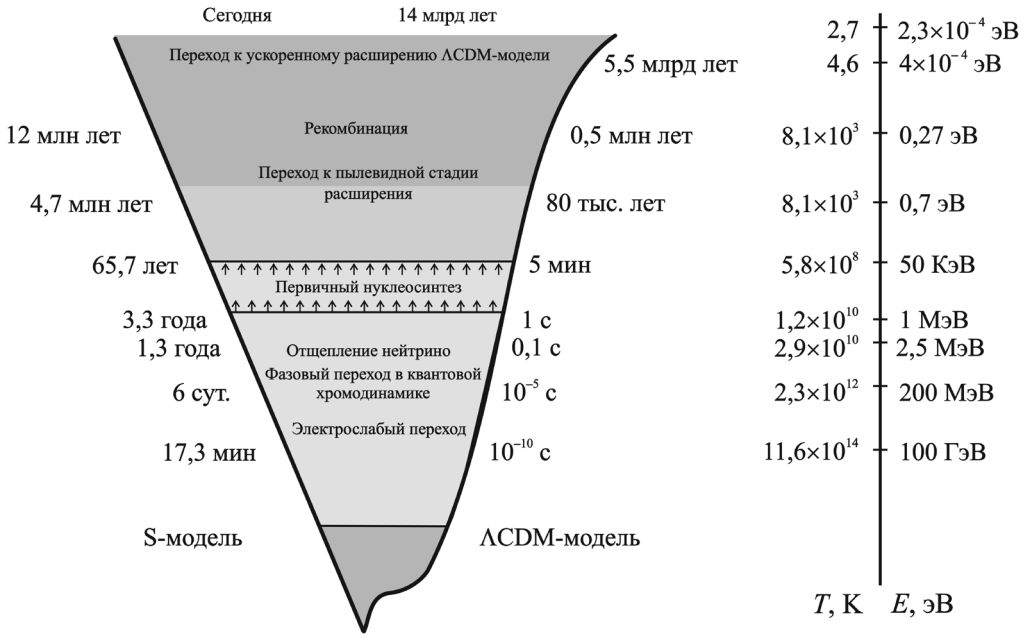



*Рис. 4.3. Схематическое изображение динамики Вселенной, а также важнейших эпох её эволюции в S- и ΛCDM-моделях*

моделью. Существенные отличия в изменениях $a(t)$ в этих моделях имеют место не только в ранней Вселенной, но и во все другие времена. Это приводит к различию интерпретаций в рамках этих моделей наблюдений, для которых существенны космологические эффекты.

Динамика расширения гравитационно-нейтральной Вселенной кардинально отличается от предсказываемой в рамках стандартной ОТО. S-модель является моделью зарядово-симметричной Вселенной, а ΛCDM-модель – моделью зарядово-асимметричной Вселенной. Первая значительно проще второй. В S-модели содержится значительно меньше произвольных допущений, чем в ΛCDM-модели.

Выбор между S- и ΛCDM-моделями может быть сделан на основе сравнения расчётных данных, полученных в рамках этих моделей, с наблюдательными данными.

В гл. 18 эти модели использованы для интерпретации трёх важнейших для космологии групп наблюдательных данных. Они тесно связаны с динамикой Вселенной. Их результат существенным образом зависит от закона изменения масштаба Вселенной $a(t)$. Показано, что эти наблюдения могут быть просто и убедительно объяснены в рамках S-модели, и это достигается за счёт выбора лишь одного хорошо измеряемого параметра – постоянной Хаббла. Объяснение этих наблюдений в рамках ΛCDM-модели достигается за счёт подбора пяти параметров, четыре из которых являются чисто подгоночными.

## 4.9. Объяснение важных для космологии наблюдений

**Время жизни Вселенной**. В S-модели время жизни Вселенной $t_0$ определяется значением постоянной Хаббла $H_0$. Оно в точности равно $H_0^{-1}$. При $H_0 = 70$ км/(с · Мпк), $t_0 \simeq 14 \cdot 10^9$ лет, а при $H_0 = 65$ км/(с · Мпк), $t_0 \simeq 15 \cdot 10^9$ лет. Эти оценки находятся в согласии с современными представлениями о времени жизни Вселенной [19; 27]. Предлагаемое в рамках ΛCDM-модели объяснение времени жизни Вселенной является значительно более сложным.

**Зависимость «звёздная величина – красное смещение».** Одним из эффективных способов проверки соответствия космологической модели реальности считается способ, основанный на сравнении теоретически рассчитанной в рамках модели и наблюдаемой зависимости «видимая звёздная величина – красное смещение» для объектов (стандартных свеч), имеющих определённую абсолютную светимость [19; 27; 77; 97; 100; 101].

Стандартными свечами, которые видны на больших расстояниях и для которых наблюдаемые красные смещения оказываются значительными ($z \leqslant 2$), являются сверхновые типа *Ia*. Считается, что в максимуме блеска они имеют вполне определённую абсолютную светимость и поэтому могут быть исполь-

зованы для установления зависимости $(M - m)(z)$. Величина $m$ определяет звёздную величину наблюдаемого объекта. Величина $M$ называется абсолютной звёздной величиной. По определению $M$ – это есть $m$ при условии, что наблюдаемый объект находится на расстоянии 10 пк от наблюдателя. Впервые для сверхновых типа *Ia* зависимость $(M - m)(z)$ была найдена в работах [97; 100]. Анализируя полученные результаты, авторы этих работ установили следующее: динамику Вселенной определяют не только силы притяжения, но и силы отталкивания. В связи с этим отметим следующее. Установление зависимости $((M - m)(z)$ из наблюдений – это одно, а её интерпретация – это несколько другое. Авторы вышеуказанных работ показали, что в рамках ОТО объяснить наблюдаемую зависимость $(M - m)(z)$ для сверхновых типа *Ia* без использования Λ-члена уравнений Эйнштейна, а также без тонкой подгонки параметров, определяющих состав космической среды, невозможно. С учётом этих предположений, кроме объяснения наблюдаемой зависимости $(M - m)(z)$, авторы [97; 100] и их последователи получили ряд «попутных» фундаментальных «результатов». Был сделан вывод об ускоренном расширении современной Вселенной, стали также утверждать, что на космологических масштабах трёхмерное пространство Вселенной является плоским.

Эти выводы не являются результатом непосредственных измерений или наблюдений. Они получены теоретически с использованием ΛCDM-модели для объяснения наблюдений. Возможно, эта модель не соответствует реальности. Для таких сомнений имеются веские основания. Наличие в модели пяти свободных параметров, физический смысл главных из которых не вполне ясен, для неё не лучшая характеристика.

Это замечание нам кажется тем более уместным, что зависимость $(M - m)(z)$ для сверхновых типа *Ia*, как показано в гл. 18, легко объясняется в рамках S-модели, содержащей лишь один хорошо измеряемый параметр.

В рамках S-модели даётся совершенно другое, чем в ΛCDM-модели, объяснение наблюдаемой динамики Вселенной. Значительно более простое и ясное. Согласно S-модели, для этого объяснения не надо предполагать наличие тёмной энергии, более того, вообще нет необходимости детально описывать состав космической среды. В задаче о глобальной динамике гравитационно-нейтральной Вселенной это оказывается неважным. Учитывая, что закон расширения описывается формулой (4.14) и считая, что $H_0 \approx 65$ км/(с · Мпк), в гл. 18 показано, что теоретически рассчитанная в рамках S-модели формула зависимости $(M - m)(z)$ очень хорошо описывает наблюдаемую.

Согласно S-модели, Вселенная расширяется равномерно. Вывод об ускоренном расширении современной Вселенной является лишь следствием применения ΛCDM-модели для объяснения наблюдений и веры в её правильность. Это широко декларируемое утверждение современной космологии не является результатом прямых измерений, как многие об этом думают. Согласно

двузнаковой гравитации утверждение об ускоренном расширении Вселенной не является правильным.

**Анизотропия реликтового излучения.** В ранней Вселенной, при температурах заметно бóльших, чем 3 000 К, барионная компонента космической среды находилась в состоянии плазмы. Длина свободного пробега фотонов в плазме определяется их взаимодействием с заряженными частицами, главным образом, с электронами [4; 19; 27].

Пока степень ионизации водород-гелиевой плазмы в расширяющейся Вселенной была заметной, длина свободного пробега фотонов была значительно меньше масштаба Вселенной. Излучение и барионная компонента космической среды находились в термодинамическом равновесии. Когда температура космической среды в расширяющейся Вселенной упала приблизительно до 3 000 К, степень ионизации плазмы стала столь малой, что длина свободного пробега фотонов стала соизмеримой с масштабом Вселенной. Произошёл «отрыв» излучения от вещества. Эпохе, во время которой это произошло, соответствуют красные смещения $z \approx 1\,000$–$1\,100$. Её в космологии называют эпохой рекомбинации [19; 27]. В эту эпоху $z = z_{rec} \approx (1\,000$–$1\,100)$. Масштаб Вселенной был приблизительно в 1 000 раз меньше, а температура излучения была во столько же раз больше их современных значений.

Оторвавшееся от вещества в эпоху рекомбинации излучение в настоящее время регистрируется как однородное изотропное чернотельное излучение, имеющее температуру $T_0 \approx 2{,}725$ К. Его называют реликтовым.

Наблюдения тонкой структуры реликтового излучения показывают, что на его равномерном фоне имеются незначительные отклонения [59; 90]. Они являются свидетельством существования неоднородностей в распределении барионной компоненты материи в эпоху рекомбинации. В современной космологии считается, что эти неоднородности явились зародышами скоплений галактик [18; 19; 27]. В рамках двузнаковой гравитации есть основания предполагать, что наблюдаемые на фоне реликтового излучения яркие пятна, имеющие угловые размеры $\leqslant 1^\circ$, являются мирами и антимирами. Эта точка зрения подробно обсуждается в гл. 25.

Моменту рекомбинации в S-модели соответствует возраст Вселенной

$$t_{rec} = \frac{H_0^{-1}}{1 + z_{rec}}. \tag{4.20}$$

Так как $H_0^{-1} \approx 14 \cdot 10^9$ лет, а $z_{rec} \approx 1\,000$, то $t_{rec} \approx 14 \cdot 10^6$ лет.

Предполагая, что миры и антимиры выделились в расширяющейся Вселенной ещё при $z \approx 10^9$ и «вморожены» в равномерно расширяющееся пространство, заключаем, что линейный размер этих образований при $z = z_{rec}$ был равным

$$d = 2\mathrm{c}t_{rec}. \tag{4.21}$$

Учитывая (4.21), в рамках S-модели можно рассчитать угловые размеры $\Delta\theta$ ярких пятен на реликтовом фоне. Согласно S-модели, в которой $a(t)$ определяется формулой (4.15), а $z_{rec} \approx 1\,000$, $\Delta\theta \approx 0{,}25^\circ$. Возможно, что применение S-модели для объяснения наблюдаемой анизотропии реликтового излучения указывает на необходимость уточнения S-модели. Этот вопрос обсуждается в п. 18.4.

Полагаем, что опыт применения двузнаковой гравитации для объяснения широкого спектра наблюдательных данных позволит высказать более точные суждения о значениях параметров $H_0$, $z_{rec}$ и законе расширения Вселенной, при которых наблюдения и расчёты окажутся согласованными.

Расчёты угла $\Delta\theta$ в рамках ΛCDM-модели и S-модели доступны в онлайн-режиме на сайте www.cosmoway.ru.

## 4.10. S- и ΛCDM-модели. Сравнение

Успешное применение S-модели для объяснения важных космологических наблюдений является серьёзным аргументом в пользу правильности предположений, лежащих в её основе.

В силу важности вопроса ещё раз отметим, в чём состоит главное различие S- и ΛCDM-моделей.

В этих моделях источником гравитационного поля является космическая среда. Считается, что она состоит из обычных и вакуумных форм материи. Обычные формы материи состоят из частиц/античастиц стандартной модели элементарных частиц, но, возможно, и её расширений [18; 19; 53].

В ΛCDM-модели гравитация не различает частицы и античастицы. Их вклады в искривление пространства-времени суммируются и сложным образом меняются в процессе эволюции Вселенной. В этой модели Вселенная является гравитационно-заряженной. Закон её расширения является сложным.

В S-модели гравитация различает частицы и античастицы. Считается, что Вселенная является симметричной по ним. Их вклады в искривление пространства-времени берутся с разными знаками и взаимно сокращаются. В этой модели Вселенная гравитационно-нейтральна. Закон её расширения является предельно простым. Она расширяется равномерно.

В ΛCDM-модели вакуумной формой материи является тёмная энергия. Убедительное описание её физических свойств в квантовой теории отсутствует.

В S-модели предполагается, что главной компонентой космической среды является физический вакуум. Считается, что частицы и античастицы являются его возбуждёнными состояниями. Вакуум является не только электро-, но и гравитационно-нейтральным. Он однородно заполняет Вселенную.

Представления о составе космической среды, лежащие в основе S-модели, можно понять в рамках существующей квантовой теории. В то же время

представления о составе космической среды, лежащие в основе ΛCDM-модели, без усложнения квантовой теории объяснить невозможно. Квантовая теория различает частицы и античастицы, ОТО – нет. Согласно квантовой теории физический вакуум является основополагающим элементом материи, но разумных способов его включения в ОТО не существует.

В связи с вакуумными формами материи отметим также следующее. Если Вселенная заполнена тёмной энергией, то её четырёхмерное пространство-время является искривлённым. При наличии обычных форм материи искривлённым является и соответствующее трёхмерное пространство. В то же время для того, чтобы в рамках ΛCDM-модели стало возможным объяснение наблюдений, приходится предполагать, что пространство является плоским [19]. Это требование вводится руками и противоречит представлению о том, что Вселенная заполнена гравитационно-заряженной материей.

Согласно S-модели Вселенная заполнена гравитационно-нейтральной материей. Её четырёхмерное пространство-время не искривлено, а трёхмерное пространство можно рассматривать как плоское. Этот вывод является следствием уравнений, описывающих гравитационно-нейтральную Вселенную, и его не надо вводить руками. О доказательстве «плоскостности» глобального трёхмерного пространства Вселенной говорят как о выдающемся достижении современной космологии [68]. В реальности «доказательство» сводится к подгонке многих параметров ΛCDM-модели под наблюдения.

Главное различие ΛCDM- и S-моделей видим в следующем: в первой из них Вселенная гравитационно-заряжена, а во второй – гравитационно-нейтральна. Существуют наблюдения, которые в рамках эйнштейновской теории тяготения трактуются как явно противоречащие идее о гравитационной нейтральности Вселенной. Считается, что в окружающем нас пространстве антивещества в заметных количествах нет. Этот вывод делается на основании того, что не наблюдаются эффекты, которые можно было бы интерпретировать как обусловленные аннигиляцией вещества и антивещества на границах их раздела.

В рамках эйнштейновской теории гравитации, не различающей частицы и античастицы, невозможно вразумительно объяснить, каким образом в ранней Вселенной мог произойти её распад на миры и антимиры. Даже если предположить, что он имел место, по какой-то неизвестной причине, то сложно понять, почему не наблюдаются границы раздела миров и антимиров, «расцвеченные» $\gamma$-излучением, имеющим специфический для процессов аннигиляции энергетический спектр. В рамках ОТО отсутствие наблюдаемых эффектов аннигиляции трактуют как свидетельство того, что наблюдаемая космическая среда состоит лишь из вещества. Считается, что оно образовалось из «лишних» барионов, возникших в ранней Вселенной в результате нарушения симметрии в процессах рождения/уничтожения барионов/антибарионов [18; 19; 53].

Приведённые аргументы в пользу отсутствия антивещества в современной Вселенной основаны на анализе наблюдений в рамках эйнштейновской теории гравитации. Согласно двузнаковой гравитации ОТО является ограниченной теорией и её нельзя применять для объяснения динамики Вселенной и наблюдаемой барионной асимметрии. Простое и ясное объяснение наблюдаемой барионной асимметрии, без усложнения квантовой теории, может быть дано в рамках двузнаковой гравитации.

В следующей главе идея о распаде Вселенной на миры и антимиры рассмотрена на качественном уровне. Более подробно эта идея обсуждается в гл. 25.

# ГЛАВА 5

# МИРЫ И АНТИМИРЫ

*Сохраняют ли свою силу законы ОТО в космологических масштабах или для крупномасштабной структуры Вселенной существенны какие-то явления, о которых мы сейчас даже и не догадываемся, – всё это нельзя выяснить ни путём «чистого мышления», ни путём чисто эмпирических наблюдений. Проблема может быть решена только сочетанием непрекращающихся усилий по накоплению данных наблюдений и разработке теоретических вопросов.*

**П. Бергман** [7]

## 5.1. Общие замечания

В квантовую теорию частицы и античастицы входят равноправно. Учитывая это, естественно думать, что во Вселенной они должны присутствовать в равных количествах. Впервые эта идея была высказана Дираком в 1933 г. и имела многочисленных сторонников [2; 44; 95].

В то же время считается, что вся совокупность наблюдательных данных позволяет уверенно говорить об обратном. В весьма большой области окружающего нас пространства вещество присутствует, а антивещества нет. Размер этой области составляет миллиарды световых лет [18; 19; 27].

В теории «перекос» состава наблюдаемой части Вселенной в сторону частиц определяют термином «барионная асимметрия». Широко распространено мнение, что барионная асимметрия является свойством всей Вселенной и она состоит лишь из вещества [19; 27].

Фактором, определяющим динамику космической среды на космологических масштабах, является гравитационное поле. Современной теорией этого поля является общая теория относительности (ОТО). В этой теории гравитация не различает частицы и античастицы, и вследствие этого в ней не содержится регулярного механизма, обеспечивающего их пространственное разделение. Считают, что во Вселенной, на всех этапах её эволюции, разделения частиц и античастиц на космологических масштабах не происходило.

В рамках ОТО, не различающей частицы и античастицы, показано, что если бы Вселенная была строго симметричной по частицам и античастицам, то в процессе её расширения и остывания все равномерно перемешанные ба-

рионы и антибарионы должны были проаннигилировать. Тогда не только антимиры, но и миры не должны были бы существовать. Наблюдения же говорят об обратном: видимая, причинно-связанная часть Вселенной содержит приблизительно $10^{79}$–$10^{80}$ протонов и нейтронов, при этом заметных количеств позитронов, антипротонов и антинейтронов в ней нет.

Согласно современным представлениям, Вселенная не является симметричной по частицам и античастицам. Чтобы объяснить наблюдаемый факт отсутствия антибарионов в окружающем нас пространстве, предполагают возможность спонтанного нарушения симметрии в реакциях рождения/уничтожения частиц/античастиц. Считается, что Мир состоит из «лишних» барионов, возникших в ранней Вселенной и сохранившихся после эпохи аннигиляции барионов и антибарионов [18]. В рамках эйнштейновской теории гравитации, в отсутствие регулярного механизма разделения частиц и античастиц, такое объяснение наблюдаемой барионной асимметрии представляется, пожалуй, единственно разумным.

Возможность принципиально другого объяснения наблюдаемой барионной асимметрии возникает, если предположить, что в реальности гравитация различает частицы и античастицы [38].

Согласно расчётам, в рамках двузнаковой гравитации процессы роста возмущений концентрации частиц и античастиц в расширяющейся Вселенной протекают совершенно не так, как это предсказывается в рамках общей теории относительности. Расчёты показывают (см. гл. 25), что вследствие наличия антитяготения между частицами и античастицами ещё в ранней Вселенной эффективно шёл процесс, в результате которого она распалась на миры и антимиры – области, содержащие лишь барионы и антибарионы соответственно. Распад Вселенной на миры и антимиры имел место в нерелятивистской (барионной) компоненте космической среды. Такого распада в релятивистской компоненте космической среды, состоящей из фотонов и нейтрино, а также их античастиц, не происходило.

Показано, что зародыши миров и антимиров возникли в эпоху аннигиляции барионов и антибарионов, а окончательно они сформировались к концу эпохи аннигиляции электрон-позитронных пар. Оставаясь «вмороженными» в равномерно растягивающееся пространство Вселенной, миры и антимиры продолжали расширяться, и к настоящему времени занимаемые ими области имеют характерные размеры – приблизительно 14 млрд световых лет. Мы находимся в одном из множества миров. Отсутствие антибарионов в нашем Мире, согласно двузнаковой гравитации, связано не с нарушением симметрии в реакциях рождения/уничтожения барионов/антибарионов, а с процессами их разделения в ранней Вселенной и её динамикой.

Миры и антимиры отталкиваются. Вследствие этого, согласно двузнаковой гравитации, не наблюдаются процессы аннигиляция вещества-антивещества

на границах их раздела. Эти процессы завершились ещё задолго до эпохи рекомбинации. Родившееся при аннигиляции частиц и античастиц излучение к началу эпохи рекомбинации успело термолизоваться.

Распад Вселенной на миры и антимиры был неизбежен вследствие внутренней природы двузнаковой гравитации. В этой гравитации частицы и античастицы имеют гравитационные заряды противоположных знаков, при этом одноимённые заряды притягиваются, а разноимённые отталкиваются. Вследствие этого, в двузнаковой гравитации, в отличие от ОТО, не различающей частицы и античастицы, существует регулярный механизм их разделения. Его действие проявилось ещё в самой ранней Вселенной, в результате чего она и распалась на миры и антимиры. Опишем качественно детали этого распада.

## 5.2. Распад Вселенной на миры и антимиры

В космической среде изначально существовали тепловые флуктуации концентрации частиц и античастиц. При этом, вследствие различия знаков гравитационных зарядов у частиц и античастиц, в расширяющейся Вселенной действовал механизм, обеспечивающий регулярный рост этих флуктуации. Он был обусловлен притяжением одноимённых гравитационных зарядов и отталкиванием разноимённых.

Механизм расслоения первоначально равномерно перемешанных в ранней гравитационно-нейтральной Вселенной частиц и античастиц состоял в следующем. Начальные флуктуации повышенной концентрации частиц создавали локальные гравитационные поля, которые притягивали частицы и выталкивали античастицы. Это создавало регулярный рост этих флуктуаций. Симметричный процесс имел место во флуктуациях с повышенной концентрацией античастиц. Имела место распадная неустойчивость, отличающаяся от джинсовской неустойчивости наличием гравитационных зарядов двух знаков. В гл. 25 показано, что скорость роста возмущений, обусловленного этой неустойчивостью, определялась равновесием сил гравитации и сил трения в противотоках вещества и антивещества.

Условия развития гравитационной и распадной неустойчивости в ранней Вселенной, согласно ОТО и двузнаковой гравитации, отличаются кардинально. В первом случае на масштабах причинно-связанных областей эти условия не выполнялись [18; 27], тогда как во втором случае они выполнялись с большим запасом [38]. Различия в условиях развития рассматриваемых неустойчивостей в этих теориях обусловлены двумя причинами. Первая из них связана с различием скоростей расширения ранней Вселенной, предсказываемых этими теориями. Согласно двузнаковой гравитации ранняя Вселенная расширяется значительно медленнее, чем это предсказывает ОТО (см. рис. 4.3). В ней нет

сверхсветовых скоростей расширения. Вторая причина: в двузнаковой гравитации существует регулярный механизм пространственного разделения частиц и античастиц, а в общей теории относительности его нет.

Согласно расчётам, в рамках двузнаковой гравитации характерное время роста возмущений концентраций частиц и античастиц, обусловленного гравитационной распадной неустойчивостью, много меньше, чем текущий возраст Вселенной. Вследствие этого, в ранней Вселенной длительное время имел место экспоненциальный рост возмущений плотности частиц и античастиц. С учётом этого, в двузнаковой гравитации проблема начальных возмущений рассматривается без каких-либо произвольных предположений. Считается, что начальными возмущениями являются тепловые флуктуации космической среды. Показано, что они к началу эпохи интенсивной аннигиляции барионов и антибарионов успевают вырасти до заметного уровня.

Рассматривались флуктуации, характерный масштаб которых равен текущему размеру причинно-связанных областей Вселенной. Они содержали приблизительно по $10^{88}$ барионов/антибарионов. Выбор флуктуаций такого масштаба связан с идеей рассматривать наблюдаемую часть современной Вселенной как следствие развития одной из флуктуаций.

Согласно статистической теории для рассматриваемых тепловых флуктуаций начальные амплитуды возмущений концентраций частиц/античастиц были на уровне $10^{-44}$ от их равновесных значений.

Рост флуктуаций в гравитационно-нейтральной равномерно расширяющейся Вселенной происходил до тех пор, пока в результате её охлаждения не началась интенсивная аннигиляция барионов и антибарионов. Как показывают расчёты (см. гл. 25), к началу эпохи аннигиляции барионов/антибарионов амплитуда возмущений концентраций частиц и античастиц в объёмах, содержавших их приблизительно по $10^{88}$ штук, успела достичь значении $\delta n/n \sim 10^{-10}$–$10^{-9}$. Она была относительно малой, но на много порядков большей, чем начальная амплитуда тепловых флуктуаций. После завершения аннигиляции «выжила» лишь «избыточная» часть барионов и антибарионов, для которых не нашлось партнёров. Их количество определялось амплитудой возмущений концентраций барионов и антибарионов в эпоху их аннигиляции. В расширяющейся Вселенной образовались области, содержащие лишь барионы (миры) и области, содержащие лишь антибарионы (антимиры). Подавляющая часть барионов и антибарионов, имевшихся до аннигиляции, проаннигилировала и превратилась в излучение и слабовзаимодействующие частицы. Отклонения концентраций частиц/античастиц от равновесных значений к началу эпохи аннигиляции барионов и антибарионов достигли значений $10^{-10}$–$10^{-9}$. К окончанию этой эпохи барион-фотонное соотношение установилось на уровне $10^{-10}$–$10^{-9}$ и в дальнейшем сохранялось. Согласно наблюдениям именно таким оно и является в настоящее время [18; 27]. Это

означает, что предлагаемый сценарий распада ранней Вселенной на миры и антимиры является разумным.

Вселенная расширяется, увеличивается её масштаб. Прошлые эпохи эволюции Вселенной удобно характеризовать величиной их красных смещений. По определению, эпохе, имеющей красное смещение $z$, соответствовал текущий масштаб Вселенной, в $(z + 1)$ раз меньший, чем современный. Например, эпохе интенсивной аннигиляции барионов и антибарионов соответствует красное смещение $z \simeq 10^{12}$, эпохе аннигиляции электрон-позитронных пар – $z \simeq 10^9$, эпохе рекомбинации – $z \simeq 10^3$ [19; 27].

Расчёты в рамках модели равномерно расширяющейся Вселенной показывают, что в конце эпохи барион-антибарионной аннигиляции, при $z \lesssim 10^{12}$, характерный размер образовавшихся зародышей миров и антимиров был приблизительно $10^6$ световых секунд. Плотность массы барионов и антибарионов к концу этой эпохи в космической среде стала приблизительно равной $10^5$–$10^6$ г/см$^3$. Зародыши миров и антимиров содержали приблизительно по $10^{79}$–$10^{80}$ барионов и антибарионов. Считается, что именно такое количество барионов и содержится в наблюдаемой части современной Вселенной.

При $z \lesssim 10^{12}$ ($T \lesssim 3 \cdot 10^{12}$ К) зародыши миров и антимиров были вморожены в релятивистскую расширяющуюся космическую среду, состоявшую в основном из электронов, нейтрино, фотонов и их античастиц. В эту эпоху подавляющая часть энергии космической среды была заключена в её релятивистской компоненте.

При $z \lesssim 10^9$ ($T \lesssim 3 \cdot 10^9$ К) произошла аннигиляция электрон-позитронных пар и Вселенная окончательно распалась на миры и антимиры. Их масштаб в это время был приблизительно $10^9$ световых секунд.

Барионы ($p$, $n$) и электроны в мирах и антибарионы ($\overline{p}, \overline{n}$) и позитроны в антимирах ещё долго, приблизительно до $z \lesssim 10^3$ ($T \lesssim 3 \cdot 10^3$ К), находились в термодинамическом равновесии с излучением. Закон расширения миров и антимиров в эпоху от $z \lesssim 10^9$ до $z \lesssim 10^3$ мало отличался от закона расширения Вселенной в целом. Различие скоростей расширения Вселенной и её структурных элементов (миров и антимиров) было связано с влиянием гравитационных полей последних на их динамику. Оно привело к тому, что при $z \lesssim 10^3$ средняя плотность обычной материи в мирах и антимирах стала на $10^{-4}$–$10^{-5}$ больше, чем её средняя плотность во Вселенной.

Согласно расчётам в рамках модели равномерно расширяющейся Вселенной размер миров и антимиров в эпоху рекомбинации ($z \lesssim 10^3$), когда барионы и антибарионы стали термодинамически независимыми от излучения, составлял приблизительно $14 \cdot 10^6$ световых лет ($\simeq 4{,}2$ Мпк). При таких линейных размерах они в настоящее время должны наблюдаться как объекты, имеющие угловой размер около четверти градуса.

Наблюдения показывают, что на равномерном фоне реликтового излучения имеются незначительные отклонения его яркости [18; 19; 90]. Согласно двузнаковой гравитации они являются свидетельством существования в эпоху рекомбинации неоднородностей в барионной и антибарионной компонентах материи. Во многих местах реликтового фона чётко наблюдаются пятна, имеющие угловые размеры около одного градуса. Учитывая оценки, приведённые выше, предполагаем, что эти пятна являются мирами и антимирами. По-видимому, они распределены в пространстве регулярно и являются наиболее крупными структурными элементами Вселенной. Мы живём в одном из миров. Полагаем, что невозможность чётко видеть в полном объёме периодичность в пространственном распределении миров и антимиров связана с «загораживающим» влиянием неоднородностей, возникших в нашем Мире значительно позже, чем он сам появился.

Миры и антимиры имеют гравитационные заряды противоположных знаков и вследствие этого не стремятся сближаться и сталкиваться. Процессы аннигиляции вещества и антивещества на границах их раздела практически выключены. Миры и антимиры «вморожены» в равномерно расширяющийся вакуум гравитационно-нейтральной Вселенной. Их современный размер составляет приблизительно $14 \cdot 10^9$ световых лет.

Различие в скорости расширения гравитационно-нейтральной Вселенной и гравитирующих миров и антимиров обусловлено влиянием гравитационных полей последних на их динамику. Приближённо можно считать, что при $z \leqslant 10^9$ миры и антимиры расширяются как независимые хаббловские шары с практически однородным начальным распределением в них вещества/антивещества.

Всё, что наблюдают астрономы, кроме реликтового излучения, приходит в основном из нашего Мира, а он состоит из вещества. Отсутствие антивещества в наблюдаемой части Вселенной, согласно предлагаемому объяснению в рамках двузнаковой гравитации, связано не с реальной барионной асимметрией, а с процессами разделения вещества и антивещества в ранней Вселенной и её общей динамикой. Согласно изложенной выше точке зрения в ранней Вселенной в огромных количествах присутствовали барионы и антибарионы. Подавляющая их часть проаннигилировала в эпоху их аннигиляции. Выжила лишь приблизительно одна миллиардная часть из них. Выжившие барионы и антибарионы образовали миры и антимиры. Распад Вселенной на миры и антимиры был обусловлен тем, что между частицами и античастицами действует антитяготение.

Полагаем, что уже более пятнадцати лет астрономы наблюдают ранние миры и антимиры. Есть основания считать, что ими являются относительно яркие пятна на почти однородном фоне реликтового излучения, имеющие угловой размер, приблизительно равный одному градусу.

Впервые идею о зарядово-симметричной Вселенной высказал П. А. М. Дирак в 1933 г. Согласовать эту идею с наблюдениями в рамках общей теории относительности оказалось невозможным. В то же время в рамках двузнаковой гравитации это согласование легко достигается. При этом можно сохранить простой и красивый вариант квантовой теории, не предполагающий возможности спонтанного нарушения симметрии в процессах рождения/уничтожения частиц/античастиц.

По-видимому, Дирак был прав, утверждая, что во Вселенной частицы и античастицы должны присутствовать в равных количествах. Он верил в правильность красивой теории!

В следующей главе рассматривается гипотеза о существовании антифотонов. Обсуждаются возможные способы их наблюдения. Предположение о существовании антифотонов не является обязательным для теории гравитации, различающей частицы и античастицы. В то же время считаем, что изучение этой возможности является оправданным, так как если идея об антифотонах окажется верной, то это будет иметь серьёзные последствия для развития физики. В противном случае необходимо будет изучать вариант теории гравитации, в котором не все частицы являются источниками гравитационного поля.

# ГЛАВА 6

# ФОТОНЫ И АНТИФОТОНЫ

*Свет – рука левая тьмы,*
*Тьма – рука правая света.*
*Двое – в одном, жизнь и смерть,*
*И лежат они вместе.*
*Сплелись неразрывно*
*Как руки любимых,*
*Как путь и конец.*
**У. Ле Гуин. «Левая рука тьмы»**

## 6.1. Антифотоны

Чтобы в двузнаковой гравитации идею о различии знаков гравитационных зарядов у частиц и античастиц согласовать с существующим представлением о том, что все компоненты космической среды являются источниками гравитационного поля, высказана следующая гипотеза: у любой частицы, в том числе и у фотона, существует античастица.

Идея об антифотонах кажется фантастической. В то же время не видно теоретических запретов на их существование. Явно различие в поведении фотонов и антифотонов должно проявляться лишь в сильных гравитационных полях. В обычных условиях оно является столь малым, что, возможно, могло «ускользнуть» от наблюдателей, поскольку его специально никто не искал.

В двузнаковой гравитации гравитационные заряды фотонов и антифотонов определяются их энергиями. Считается, что они имеют противоположные знаки. Возможно, фотоны и антифотоны отличаются друг от друга не только знаком гравитационного заряда, но ещё и спиральностями (см. гл. 23).

Различие поведения фотонов и антифотонов в гравитационном поле должно проявляться в наблюдениях. Доказательство существования такого различия имело бы огромное значение для развития физики.

В двузнаковой гравитации фотоны и антифотоны имеют гравитационные заряды противоположных знаков, поэтому одно и то же гравитационное поле они воспринимают по-разному. Вследствие этого, при заданных условиях, их поведение неодинаково. Изменение частоты фотонов и антифотонов в гравитационном поле происходит различным образом. Гравитационные поля тел, состоящих из вещества, являются полями притяжения для фотонов и полями отталкивания для антифотонов. Обратная ситуация возникнет в случае гравитационных полей тел, состоящих из антивещества. Согласно двузнаковой

гравитации, там, где для фотонов гравитационное смещение является красным, для антифотонов – синим, и наоборот.

Рассмотрим наблюдения, в которых, согласно двузнаковой гравитации, присутствие антифотонов должно проявиться.

## 6.2. Антифотоны в гравитационном поле Земли

Согласно двузнаковой гравитации при подъёме фотонов и антифотонов в гравитационном поле Земли их частота должна меняться по-разному. Для фотонов она уменьшается, а для антифотонов – увеличивается. В гл. 23 показано, что формулы, определяющие изменение частоты $\nu$ фотонов и $\overline{\nu}$ антифотонов, при их вертикальном подъёме в поле тяжести Земли на высоту $h$ ($h \ll R$, $R$ – радиус Земли), имеют вид

$$\nu(h) = \nu_0\left(1 - \frac{gh}{c^2}\right), \quad \overline{\nu}(h) = \nu_0\left(1 + \frac{gh}{c^2}\right),$$

где $g \simeq 9{,}8$ м/с$^2$, $c$ – скорость света.

Экспериментальные методы позволяют измерять очень малые смещения частоты фотонов. Ещё в 1959 г. американским физикам Р. Паунду и Д. Ребке удалось наблюдать, с использованием эффекта Мёссбауэра, гравитационное смещение спектральных линий $\gamma$-излучения при его распространении в поле тяжести Земли [98]. Проходимый путь составлял, по вертикали, приблизительно 22 м. В этом случае ожидаемое смещение для фотонов $\Delta\nu/\nu_0 \approx 2{,}5 \cdot 10^{-15}$. Измерения дали именно этот результат. В этом сложном и длительном эксперименте было найдено то, что искали – красное гравитационное смещение $\gamma$-квантов. Повторение аналогичных измерений для антифотонов в предположении их существования являются актуальной задачей.

## 6.3. Антифотоны в сильном гравитационном поле

В спектрах источника SS 433 проявляются яркие эмиссионные линии водорода, гелия и некоторых других элементов, имеющих следующие особенности. Около каждой основной линии $\lambda_i$ существует две дополнительные: $\lambda_{iB}$ – смещённая в синюю, и $\lambda_{iR}$ – смещённая в красную сторону относительно $\lambda_i$ [69]. Считается, что расщепление эмиссионных линий на три связано с доплеровским сдвигом длин волн. Предполагается, что в излучающем объекте имеются три области, движущиеся по отношению к наблюдателю с различной скоростью. Чтобы объяснить наблюдения, предполагают, что линии $\lambda_{iB}$ и $\lambda_{iR}$ излучаются атомами двух «холодных» газовых струй, бьющих вдоль одной линии в про-

тивоположных направлениях со скоростями приблизительно 0,27 скорости света. Чтобы происходило излучение эмиссионных линий и они проявлялись, струи должны быть не только «холодными» ($T \leqslant (1–2) \cdot 10^4$ K), но и узкими (угловое расхождение струй $\leqslant$(1–2) градуса).

Альтернативное объяснение расщеплений эмиссионных линий источника SS 433 основано на идее существования антифотонов. Считается, что это расщепление связано с различием влияния гравитации на фотоны и антифотоны. Такое объяснение подробно обсуждается в гл. 24.

Наблюдаемое расщепление эмиссионных спектральных линий источника SS 433 на две можно трактовать как подтверждающее идею двузнаковой гравитации с антифотонами. Возможно, что антифотоны в линиях $\lambda_{iB}$ и фотоны в линиях $\lambda_{iR}$ источника SS 433 отличаются знаком спиральности. Проверка этой гипотезы является важной задачей.

## 6.4. О расщеплении спектра аннигиляционных γ-квантов

В окрестности релятивистских объектов (нейтронных звёзд, чёрных дыр и других) могут происходить процессы рождения/уничтожения частиц/античастиц [19; 27]. При этом, учитывая идею о «гравитационных зарядах», естественно считать, что при аннигиляции частиц/античастиц, кроме фотонов, рождаются и антифотоны.

Если с поверхности этих объектов, имеющих массу $M$ и радиус $R$, излучаются фотоны и антифотоны с частотой $\nu_0$, то вдалеке от них, согласно двузнаковой гравитации, должно наблюдаться расщепление этой линии на две. Оно обусловлено различием влияния гравитационного поля на фотоны и антифотоны. Предполагаемое смещение расщеплённых линий относительно $\nu_0$

$$\Delta\nu \leq \pm \frac{1}{2} \frac{r_g}{R} \nu_0,$$

где $r_g = 2GM/c^2$ – гравитационный радиус этих объектов. В случае аннигиляции электрон-позитронных пар $\nu_0 \simeq m\,c^2/h$, где $m$ – масса электрона. Для нейтронных звёзд ($r_g \approx 5 \cdot 10^5$ см, $R \leqslant 4r_g$ [51; 63], $\Delta\nu/\Delta\nu_0 \leqslant 0{,}12$) расщепление является значительным и должно чётко проявляться в наблюдениях. Возможно также, что в расщеплённых линиях будет наблюдаться различие спиральностей фотонов и антифотонов. На рис. 6.1 схематично показаны две возможных формы спектров γ-квантов, рождающихся в окрестности релятивистских объектов в процессах аннигиляции электрон-позитронных пар. В случае *а)* считается, что рождаются только фотоны, тогда как в случае *б)* предполагается, что в равных количествах рождаются фотоны и антифотоны.

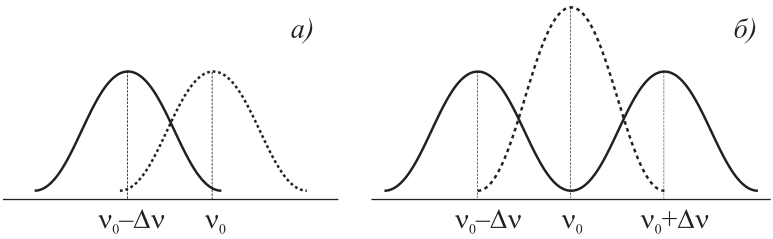



*Рис. 6.1. Схематичное изображение двух возможных форм спектров γ-квантов, рождающихся на поверхности релятивистской звезды при аннигиляции электрон-позитронных пар: а) рождаются только фотоны; б) рождаются фотоны и антифотоны*

## 6.5. Релятивистские объекты на фоне гравитационных линз

Согласно двузнаковой гравитации можно ожидать, что в окрестности релятивистских объектов в реакциях аннигиляции в равных количествах рождаются гамма-кванты и анти гамма-кванты. Если это так, то при наблюдении этих объектов на фоне гравитационных линз должны наблюдаться особенности в их гамма-изображениях, обусловленные различием отклонений фотонов и антифотонов в гравитационном поле линзы. Гравитационные линзы, состоящие из вещества, являются притягивающими для фотонов и отталкивающими для антифотонов. Влияние гравитационных линз, состоящих из антивещества, является противоположным. Учитывая это, можно ожидать, что луч света, идущий от релятивистского объекта в поле гравитационной линзы, расщепится на два луча – фотонный и антифотонный. Вследствие этого должно наблюдаться расщепление изображения релятивистских объектов на фоне гравитационных линз. В зависимости от взаимного положения излучающего объекта, гравитационной линзы и приёмника будут различными карты изображений наблюдаемого объекта. Эти карты, кроме изображения, предсказываемого ОТО, должны содержать ещё и смещённое изображение этого же объекта, создаваемое антифотонами. Излучения расщеплённых изображений, возможно, имеют круговые поляризации разных знаков.

## 6.6. Гравитационные линзы на реликтовом фоне

Вселенная практически однородно заполнена реликтовым излучением. Оно является чернотельным, и его современная температура приблизительно 2,725 К [19; 27]. В рамках двузнаковой гравитации естественно считать, что реликтовое излучение содержит одинаковые количества фотонов и антифотонов.

Наблюдения тонкой структуры реликтового излучения показывают, что на его равномерном фоне имеются незначительные отклонения яркости.

Возможны две главные причины их возникновения. Первая связана с неоднородностью «поверхности» отрыва реликтового излучения от вещества/антивещества в эпоху рекомбинации; вторая – с неоднородностью среды, через которую распространяется реликтовое излучение.

Неоднородности в распределении вещества/антивещества в эпоху рекомбинации в двузнаковой гравитации интерпретируется как ранние миры и антимиры. Они должны проявляться не только в наблюдаемой анизотропии температуры реликтового излучения, приходящего из этих областей, но, возможно, и в анизотропии его поляризации (см. гл. 23).

Неоднородности космической среды являются для проходящего через них реликтового излучения гравитационными линзами. Есть основание предполагать, что бóльшая часть наблюдаемой Вселенной является Миром и состоит из вещества [19; 27]. Если это так, то согласно двузнаковой гравитации наблюдаемые гравитационные линзы для фотонов являются собирающими, а для антифотонов – рассеивающими. При этом если линза сферически симметрична и находится не слишком далеко, то в реликтовом излучении она будет наблюдаться как имеющая более яркую центральную часть (фотоны) и более слабое диффузное кольцо, охватывающее её (антифотоны). Если фотоны и антифотоны различаются спиральностями, то это также должно наблюдаться. У излучения в центральной части изображения и в кольце направления поляризаций должны быть противоположными. В случае линз более сложной геометрической конфигурации отмеченные особенности должны проявляться в изображениях отдельных её элементов.

## 6.7. Антифотоны из чёрных дыр

Согласно общей теории относительности тело, падающее на чёрную дыру, поглощается ею. Согласно двузнаковой гравитации падение тела на чёрную дыру происходит принципиально иначе. Учитывается, что заметная часть кинетической энергии падающего тела в чёрной дыре преобразуется в антифотоны и антинейтрино, которые затем «выталкиваются» из неё. В этой теории чёрная дыра для античастиц является мощнейшим центром антитяготения. Эта идея положена в основу простого и понятного объяснения наблюдаемых свойств гамма-всплесков (см. п. 23.6).

## 6.8. Фотоны и антифотоны. Ожидания

Параметром, который, кроме знака гравитационного заряда, отличает фотоны от антифотонов, возможно, является их спиральность (см. п. 23.1). Если в реальности фотоны и антифотоны отличаются знаком спиральности, то они легко могут быть разделены. Для этого следует воспользоваться отличием законов распространения фотонов с разной поляризацией в анизотропных средах [49].

Если гравитация различает поляризацию фотонов, то это может стать эффективным инструментом для изучения её свойств. Фотоны и антифотоны, прошедшие через гравитационные поля, можно будет сепарировать, принимать с огромных расстояний и с высочайшей степенью точности изучать результат их взаимодействия с этими полями.

Различие в поведении фотонов и антифотонов в гравитационных полях может найти широкое применение на практике. Приведём лишь некоторые возможные варианты такого применения.

Различие влияния гравитации на фотоны и антифотоны может быть использовано для изучения процессов, протекающих в окрестности релятивистских объектов.

Отделяя антифотоны и поглощая их, можно пытаться создать объекты, на которые будет действовать антитяготение.

Различие в траекториях движения фотонов и антифотонов может быть использовано для регистрации возмущений пространства-времени во Вселенной (гравитационных волн).

# ГЛАВА 7

# ДВУЗНАКОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ. ИДЕИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

*Нам не дано предугадать,*
*Как слово наше отзовётся...*
**Ф. И. Тютчев**

В этой главе, подводя итоги качественному описанию двузнаковой гравитации, сформулируем, по возможности, более точно основополагающие идеи предлагаемой теории, а также её проблемы. Приведём перечень важных результатов, полученных в рамках этой теории. Их теоретическое обоснование и подробный анализ содержится во второй и третьей частях книги.

**Общие замечания.** В современной теории гравитации существуют фундаментальные проблемы, указывающие на её неполноту. Приведём лишь некоторые из них.

1. В общей теории относительности (ОТО) для объяснения наблюдаемой динамики космической среды на галактических и б*о*льших масштабах приходится предполагать существование двух гипотетических сред: тёмной материи и тёмной энергии. Нет простого и убедительного объяснения их физической природы, подтверждающегося в экспериментах и наблюдениях.

2. Многочисленные попытки построения на основе общей теории относительности квантовой теории гравитации до сих пор не были успешными.

3. В ОТО существуют сингулярные решения. В рамках этой теории нет разумного способа их устранения.

4. Общая теория относительности не учитывает влияние физического вакуума квантовой теории на гравитацию. В то же время в этой теории нет ответа на вопрос, почему вакуум является гравитационно-нейтральным.

Есть основания считать, что ОТО неправильно описывает гравитационное взаимодействие частиц и античастиц, а также гравитационные свойства вакуума и вследствие этого является ограниченной теорией.

В ОТО считается, что источником гравитации является энергия (точнее, тензор энергии-импульса). Согласно релятивистской квантовой теории античастицу можно рассматривать как частицу, но с отрицательной энергией и движущуюся во времени вспять. В общей теории относительности это различие частиц и античастиц не учитывается. Предполагаем, что при этом допускается ошибка.

Считаем, что многие фундаментальные проблемы общей теории относительности являются её следствием. Для устранения этой ошибки предложена

теория, в которой, в отличие от ОТО, гравитация различает частицы и античастицы. Она названа двузнаковой гравитацией.

Опровергает ли двузнаковая гравитация общую теорию относительности? Никоим образом! ОТО является предельным случаем двузнаковой гравитации, когда космическая среда состоит лишь из вещества или антивещества и когда влияние вакуума на гравитацию можно не учитывать.

**Двузнаковая гравитация и ОТО.** Двузнаковая гравитация является развитием общей теории относительности. В этой теории, как и в ОТО, гравитационное поле рассматривается как искривлённость пространства-времени. Величинами, описывающими это поле, являются компоненты метрического тензора. Левые, геометрические части уравнений двузнаковой гравитации и общей теории относительности одинаковы и описываются тензором Эйнштейна. Как и в общей теории относительности, в двузнаковой гравитации источником гравитационного поля является тензор энергии-импульса материи.

Вместе с тем существует принципиальное отличие двузнаковой гравитации от общей теории относительности. Оно заключается в том, что вклады частиц и античастиц в тензор энергии-импульса в правой части уравнений для гравитационного поля берутся с противоположными знаками. Двузнаковая гравитация, в отличие от общей теории относительности, различает частицы и античастицы. В этой теории, следуя Фейнману, античастицы рассматриваются как частицы, но с отрицательной энергией и движущиеся во времени вспять. Использование этой идеи в двузнаковой гравитации позволяет:

- сохранить положение ОТО о том, что источником гравитационного поля является тензор энергии-импульса, но при этом учесть различие в гравитации частиц и античастиц;
- непротиворечивым образом совместить закон сохранения энергии и гравитационного заряда в любых элементарных процессах взаимодействия частиц/античастиц, в том числе и тогда, когда имеет место их рождение и уничтожение.

**Различия ОТО и двузнаковой гравитации**

В общей теории относительности:

- гравитация не различает частицы и античастицы. Считается, что их энергии имеют одинаковый знак;
- современная Вселенная состоит лишь из частиц (барионная асимметрия);
- космическая среда имеет сложный состав. Её компонентный состав в значительной степени является гипотетическим. Считается, что в современной Вселенной главными компонентами космической среды являются тёмная энергия и тёмная материя. Их природа неясна.

В двузнаковой гравитации:

- главной компонентой космической среды является физический вакуум. Частицы и античастицы являются возбуждёнными состояниям вакуума. Ча-

стицы – состояниями с положительной энергией, а античастицы – состояниями с отрицательной энергией. В состав космической среды входят лишь те стабильные частицы/античастицы, которые наблюдаются в реальных экспериментах и содержатся в стандартной модели элементарных частиц;

- гравитация различает частицы и античастицы. Античастица рассматривается как частица, но с отрицательной энергией и движущаяся во времени вспять;
- Вселенная симметрична по частицам и античастицам. В целом она не только электро-, но и гравитационно-нейтральна;
- в ранней Вселенной произошёл её распад на миры и антимиры.

Учёт двузнаковости энергии (гравитационных зарядов) приводит к существенному отличию двузнаковой гравитации от ОТО. Меняются представления о вакууме, о пространстве-времени, о компонентном составе и динамике космической среды, о гравитационном поле и многом другом. По содержанию двузнаковая гравитация значительно богаче, чем ОТО.

**Пространство-время в двузнаковой гравитации.** В двузнаковой гравитации, как и в ОТО, гравитационное поле связано с искривлённостью пространства-времени. В то же время в отличие от общей теории относительности в двузнаковой гравитации представления частиц и античастиц о гравитационном поле, а следовательно, и о геометрических свойствах пространства-времени различаются. То, что для частиц является полем притяжения, для античастиц – полем отталкивания, и наоборот.

Частицы и античастицы в гравитационном поле движутся по геодезическим. В то же время, поскольку представления частиц и античастиц о гравитационном поле (метрике пространства-времени) отличаются, то различный вид в их представлениях имеют и геодезические.

Согласно двузнаковой гравитации совершенно по-иному в гравитационном поле ведут себя масштабы и часы из вещества и антивещества. Например, твердотельный масштаб из вещества, падающий радиально в центральном поле положительной массы, растягивается. Наоборот, такой же масштаб, но из антивещества, приближающийся радиально к этой массе, сжимается.

В гравитационном поле положительной массы происходит замедление хода часов, состоящих из вещества, и ускорение их хода, если они состоят из антивещества. Противоположным описанному выше будет поведение масштабов и часов в гравитационном поле массы, состоящей из антивещества.

**Состав космической среды.** Согласно двузнаковой гравитации космическая среда Вселенной состоит из обычной и вакуумной материи. Обычная материя содержит две компоненты: нерелятивистскую и релятивистскую. Нерелятивистская (барионная) компонента состоит из протонов, нейтронов и электронов, а также их античастиц. Релятивистская компонента включает в себя реликтовое излучение, состоящее из фотонов и антифотонов, и нейтринную

компоненту, состоящую из трёх поколений нейтрино и соответствующих им антинейтрино. Вакуумной материей является то, что составляет физический вакуум квантовой теории. В состав космической среды включается лишь то, что наблюдается в реальных экспериментах и может быть описано в рамках стандартной теории частиц, учитывающей следующее уточнение: у любой частицы, в том числе и у фотона, существует античастица. Это уточнение вводится для того, чтобы идею двузнаковости гравитации согласовать с существующим представлением о том, что все без исключения компоненты космической среды являются источниками гравитационного поля.

**Замечание.** Гипотетически возможен вариант теории гравитации, в котором гравитация различает частицы и античастицы, но некоторые из них тождественны друг другу и имеют нулевой гравитационный заряд. Вариант теории, в котором все частицы и античастицы являются источниками гравитации, нам кажется предпочтительным. В нём, как и в ОТО, содержится идея о том, что источником гравитации является энергия, но при этом учитывается, что энергии частиц и античастиц отличаются знаками.

**Вакуум в двузнаковой гравитации.** В двузнаковой гравитации главной компонентой космической среды является вакуум. В нём содержится подавляющая часть положительных и отрицательных энергий, содержащихся во Вселенной.

Реальные частицы и античастицы являются возбуждёнными состояниями вакуума. Частицы – состояниями с положительной энергией, а античастицы – состояниями с отрицательной энергией. Сгустки вещества и антивещества являются лишь малыми возмущениями на фоне однородного вакуума, обладающего огромной энергоёмкостью.

Вакуум обладает очень большой плотностью виртуальных частиц и античастиц, постоянно рождающихся и уничтожающихся. От него нельзя заэкранироваться. Он является квантовым объектом, неразрывно связанным с пространством и временем. Вакуум является материальной, а пространство-время геометрической составляющей единого физического объекта «вакуум-пространство-время».

Гравитационно-нейтральный вакуум, как и реликтовое излучение, выделяет привилегированную локально-инерциальную систему отсчёта. Показано, что наличие такой системы отсчёта не нарушает принципов специальной теории относительности, но при этом необходимо учитывать, что параметры частиц и античастиц реально зависят от скорости их движения в вакууме. Учитывая существование привилегированной системы отсчёта, эффекты специальной теории относительности следует рассматривать не как кинематические, а как динамические, обусловленные влиянием вакуума на частицы и античастицы.

Показано, что такие величины, как масса покоя и время жизни частиц и античастиц, которые в современной физике считаются универсальными констан-

тами во всех локально-инерциальных системах отсчёта, в реальности таковыми не являются. Абсолютный смысл они имеют лишь в привилегированной системе отсчёта, связанной с вакуумом.

Показано, что вследствие движения Солнечной системы в вакууме со скоростью приблизительно 390 км/с в направлении созвездия Девы должна наблюдаться анизотропия массы и времени жизни релятивистских частиц/античастиц на уровне 0,13 % от их средних значений. Существование этой анизотропии для реликтового излучения является надёжно установленным фактом (Нобелевская премия по физике, 2006 г.). Доказательство существования анизотропии параметров массовых частиц и античастиц, связанной с движением Земли относительно вакуума, является актуальной задачей.

Влияние вакуума на частицы и античастицы становится явным, когда меняется скорость или направление их движения в нём. Согласно двузнаковой гравитации это влияние обнаруживается в виде сил инерции, действующих на частицы и античастицы. Вакуум их различает. Показано, что инерция, как и гравитация, является двузнаковой. Наличие сил инерции и гравитации связано с деформациями вакуума-пространства-времени.

Вакуум в целом является электро- и гравитационно-нейтральным. Гравитационная нейтральность вакуума в целом не означает, что это имеет место на любых масштабах. На микроскопических масштабах ($\leqslant 10^{-12}$ см) существуют нарушения гравитационной нейтральности вакуума, связанные с его квантовым поведением. На макроскопических масштабах ($\geqslant 10^{24}$ см) они связаны с его поляризацией в гравитационных полях сгустков материи. Показано, что влияние гравитационной поляризации вакуума приводит к кардинальному изменению гравитационных полей на галактических и б*о*льших масштабах. Идея о влиянии вакуума на гравитационные поля является альтернативой идее о существовании тёмной материи.

Показано, что гравитационное поле точечной массы, находящейся в гравитационно-нейтральном вакууме, имеет сложную радиальную структуру. Оно является не только полем притяжения, но одновременно и полем отталкивания. Есть основания считать, что в не слишком сильных гравитационных полях масштаб гравитационной поляризации вакуума приблизительно равен $10^{24}$ см.

**Гравитационная нейтральность Вселенной.** В двузнаковой гравитации считается, что все частицы и античастицы, в том числе и виртуальные, являются источниками гравитационного поля. Вселенная в целом симметрична по частицам и античастицам. На космологических масштабах гравитационное поле отсутствует. Наличие гравитационных полей во Вселенной связано с существованием в ней неоднородностей в распределениях барионной и антибарионной компонент космической среды.

Предложена космологическая модель однородной изотропной гравитационно-нейтральной Вселенной (S-модель). Согласно этой модели в гравитаци-

онно-нейтральной Вселенной имеет место равновесие сил тяготения и антитяготения и вследствие этого она расширяется равномерно. Её трёхмерное пространство на космологических масштабах является плоским. S-модель имеет ясный физический смысл. Она содержит лишь один свободный параметр – постоянную Хаббла. Он определяет возраст современной Вселенной.

Показано, что в рамках модели равномерно расширяющейся Вселенной значительно проще и убедительнее, чем в рамках ΛCDM-модели, основанной на общей теории относительности, объясняется наблюдаемая динамика Вселенной. Это важный аргумент в пользу правильности идей, лежащих в основе двузнаковой гравитации.

**Структуры во Вселенной. Миры и антимиры.** В двузнаковой гравитации существует естественный механизм возникновения и роста гравитационно-связанных структур. Считается, что начальными возмущениями являются тепловые флуктуации космической среды. Показано, что вследствие наличия антитяготения между частицами и античастицами в эпоху, когда ещё все компоненты космической среды находились в тепловом и химическом равновесии, в ней существовали условия роста возмущений концентраций частиц и античастиц.

Начальные тепловые флуктуации повышенной концентрации частиц создавали локальные гравитационные поля. Они притягивали в эти флуктуации частицы и выталкивали из них античастицы. Это создавало регулярный рост рассматриваемых флуктуаций. Симметричный процесс роста флуктуаций происходил в местах повышенной концентрации античастиц.

Показано, что к началу эпохи аннигиляции барионов и антибарионов относительное значение амплитуды возмущений концентраций частиц и античастиц в причинно-связанных областях, содержавших их порядка $10^{88}$ штук, достигло значений $10^{-10}$–$10^{-9}$. После завершения аннигиляции барионов и антибарионов оказались выжившими лишь незначительные избытки частиц над античастицами и античастиц над частицами, имевшиеся в рассматриваемых возмущениях на начало этой эпохи. Расширяющаяся Вселенная распалась на зародыши миров и антимиров. Подавляющая часть барионов и антибарионов, имевшихся до аннигиляции, проаннигилировала и превратилась в излучение и слабовзаимодействующие нейтрино. Барион-фотонное соотношение установилось на уровне $10^{-10}$–$10^{-9}$.

После завершения аннигиляции электрон-позитронных пар (в эпоху $z \lesssim 10^{-9}$) Вселенная окончательно распалась на миры и антимиры, погружённые в почти однородный равномерно расширяющийся вакуум-пространство-время. Наблюдаемая барионная асимметрия не является глобальной. Наш Мир – лишь один из бесконечного множества миров и антимиров.

Приведены соображения в пользу гипотезы о том, что уже более пятнадцати лет астрономы видят миры и антимиры. Ими, по мнению авторов, являются

объекты, наблюдаемые как относительно яркие пятна на почти однородном фоне реликтового излучения, имеющие характерный угловой размер около одного градуса. Современный размер миров и антимиров составляет приблизительно 14 млрд световых лет.

Согласно двузнаковой гравитации миры и антимиры являются самыми крупными неоднородностями Вселенной. В процессе её расширения каждый из них распался на множество более мелких фрагментов (звёзды, галактики, их скопления и др.). Миры и антимиры являются лишь «мелкой рябью» в электро- и гравитационно-нейтральном вакууме, обладающем огромной энергоёмкостью.

**Двузнаковая гравитация и наблюдения.** В силу слабости влияния гравитации на отдельные элементарные частицы, а также вследствие отсутствия в окружающем нам мире макроскопических тел, состоящих из антивещества, пока в прямом лабораторном эксперименте доказать различие этого влияния на частицы и античастицы не удаётся, хотя исследования в этом направлении ведутся.

В книге указано на ряд случаев, в которых различие влияния гравитации на частицы и античастицы может быть установлено в астрономических наблюдениях. Есть основания считать, что это различие уже давно наблюдается.

Эффекты двузнаковости гравитации должны проявляться при рассмотрении макроскопических явлений, в которых в соизмеримых количествах присутствуют частицы и античастицы. Эта точка зрения находит подтверждение в космологии. Показано, что в рамках предельно простой космологической модели, основанной на двузнаковой гравитации, значительно проще и убедительнее, чем в рамках модели, базирующейся на общей теории относительности, объясняются наблюдения, для которых важны космологические эффекты.

Различие поведения частиц и античастиц должно проявляться в сильных гравитационных полях. Приведём яркий пример, указывающий на это.

Известно физическое явление, именуемое как гамма-всплески. Наблюдения показывают, что существует процесс, в котором за очень короткие по астрономическим масштабам времена (секунды и доли секунды) выделяется энергия в виде гамма-квантов, суммарная величина которой соизмерима, а в некоторых случаях и больше, чем полная энергия Солнца. Характерные энергии гамма-квантов в этом процессе – десятки и сотни килоэлектронвольт. Иногда наблюдаются гамма-всплески, в которых энергии квантов значительно больше.

Многочисленные попытки объяснения природы гамма-всплесков в рамках существующих теорий не являются убедительными. Они скорее указывают лишь на то, что эти теории для объяснения этого явления не годятся.

Простое и ясное качественное объяснение природы гамма-всплесков в рамках двузнаковой гравитации предложено в книге.

Предполагается, что гамма-всплески связаны с падением на массивные чёрные дыры компактных космических тел, имеющих звёздные массы. Учитывается, что при падении в чёрные дыры эти тела разгоняются до огромных энергий. В чёрной дыре эта энергия преобразуется в частицы и античастицы, которые в итоге превращаются в основном в фотоны, антифотоны, нейтрино и антинейтрино.

В ОТО не существует эффективного механизма выхода образовавшихся внутри горизонта событий чёрной дыры частиц и античастиц в окружающее пространство. Другая ситуация в двузнаковой гравитации. За счёт антитяготения из чёрной дыры должны вылететь все образовавшиеся в ней антифотоны и антинейтрино.

В рамках этой идеи можно качественно объяснить все существенные особенности гамма-всплесков: величину их энерговыделения и характерные энергии вылетающих античастиц; краткость процесса энерговыделения во времени, а также большое разнообразие форм кривых их блеска.

Объясняя природу гамма-всплесков (в реальности, как мы считаем, антигамма-всплесков), двузнаковая гравитация предсказывает, что одновременно с ними происходят всплески антинейтринного излучения. Параметры антинейтринных всплесков аналогичны параметрам антигамма-всплесков. Они имеют подобные энергетические спектры и одинаковые по форме кривые блеска. Что очень существенно: все антинейтрино в предсказываемых всплесках имеют одинаковую спиральность!

Учитывая огромную мощность энерговыделения и его характерный энергетический спектр, можно целенаправленно ставить эксперименты по регистрации нейтринных (антинейтринных) всплесков, состоящих из нейтрино (антинейтрино) определённой спиральности. Если будет показано, что такие всплески существуют, то это будет веским аргументом в пользу идеи о том, что гравитация различает частицы и античастицы и является двузнаковой.

Можно гипотетически предполагать, что фотоны и антифотоны, кроме знаков гравитационных зарядов, отличаются, так же как нейтрино и антинейтрино, спиральностями. Если эта гипотеза верна, то экспериментальное доказательство того, что все фотоны в гамма-всплесках имеют одинаковую спиральность, будет явным указанием на двузнаковость гравитации.

В книге обращается внимание и на ряд других случаев, в которых различие влияния гравитации на частицы и античастицы должно проявляться в наблюдениях. Особое внимание уделяется доказательству существования антифотонов. Для фотонов и антифотонов различие влияния на них гравитации установить проще, чем в случаях других частиц и античастиц. Если существование антифотонов будет установлено, это может найти широкое практическое применение. Например, для изучения процессов, протекающих

в окрестностях релятивистских объектов; для создания объектов, на которые будет действовать антитяготение; для регистрации гравитационных волн.

**Две главные проблемы двузнаковой гравитации.** Главной проблемой двузнаковой гравитации является отсутствие убедительного доказательства в прямом эксперименте существования при одинаковых условиях различия в поведении частиц и античастиц в гравитационном поле.

Эксперименты, осуществляемые коллаборацией АЛЬФА в ЦЕРНе, с целью выявления этого различия, проводятся в условиях, в которых существенно действие электромагнитных сил. Эти силы сами по-разному влияют на частицы и античастицы и притом на много порядков сильнее, чем гравитационные силы. Всегда будет оставаться возможность доказывать, что наблюдаемое различие в поведении частиц и античастиц связано с влиянием электромагнитных, а не гравитационных сил.

В отличие от этого, в описанных в книге способах доказательства различия действия гравитации на фотоны и антифотоны влияние негравитационных сил не является существенным. В этом заключается их преимущество перед экспериментами коллаборации АЛЬФА.

В теоретическом плане главную проблему двузнаковой гравитации видим в необходимости доведения идеи Дирака о частицах и античастицах до её логического завершения. Необходимо, чтобы частицы и античастицы описывались в теории совершенно симметрично. Квантовые распределения рассматривались не только для состояний с положительными, но и совершенно равноправно для состояний с отрицательными энергиями и температурами.

В будущей квантовой теории двузнаковой гравитации, как и в классической, главной компонентой космической среды должен быть физический вакуум, а реальные частицы и античастицы являться его возбуждёнными состояниями, имеющими противоположные по знаку энергии. В этой теории время, а также параметры, определяющие свойства вакуума, частиц и античастиц, должны меняться в пределах от $-\infty$ до $+\infty$. Идею Фейнмана о том, что античастицы можно описывать как частицы, но с отрицательными энергиями и движущимися во времени вспять, по-видимому, следует рассматривать как отражение реально существующей в природе симметрии между прошлым и будущим и её глубинной связи с направлениями эволюции миров и антимиров.

ЧАСТЬ II

# ГРАВИТАЦИОННО-НЕЙТРАЛЬНАЯ ВСЕЛЕННАЯ

# ГЛАВА 8

# СОСТАВ ВСЕЛЕННОЙ И ЕЁ ДИНАМИКА

Представления о составе космической среды и её распределении во Вселенной за последние 30–40 лет претерпели существенные изменения. Есть основание предполагать, что и современные представления об этом уже в недалёком будущем, так же как и предыдущие, могут кардинально измениться. Приведём краткое описание того, какими были представления о составе Вселенной ещё сравнительно недавно, какими они являются в настоящее время и какими, согласно двузнаковой гравитации, они должны быть.

## 8.1. Представления прошлого века

Ещё лет сорок назад существовали следующие представления о составе космической среды во Вселенной и её пространственном распределении [29; 30; 61; 72].

Считали, что бóльшая часть наблюдаемого в различных диапазонах электромагнитных волн вещества Вселенной, определяемая в настоящее время как барионная компонента космической среды, содержится в звёздах. Полагали, что в звёздах собрано не менее 97 % всей материи Вселенной. Например, крупнейший советский астрофизик И. С. Шкловский писал: «Если задать наивный детский вопрос, какие из космических объектов во Вселенной “самые главные”, я, не колеблясь, отвечу: звёзды. Почему? Ну, хотя бы потому, что 97 % вещества в нашей Галактике сосредоточено в звёздах. У многих, если не у большинства, других галактик “звёздная субстанция” составляет более чем 99,9 % их массы. Похоже на то, что плотность крайне разреженного, пока ещё с достоверностью не обнаруженного, межгалактического газа слишком мала, потому что основная часть вещества во Вселенной сосредоточена в галактиках, а следовательно, в звёздах...» [72].

Звёзды гравитационно связаны в образования, называемые галактиками. Их характерные размеры $\leqslant$0,01–0,2 Мпк. Галактики содержат миллиарды и сотни миллиардов звёзд. Галактики образуют гравитационно-связанные системы – скопления галактик. Их характерные размеры $\leqslant$2–4 Мпк. Скопления галактик содержат сотни и тысячи галактик [1; 24].

На размерах $\leqslant$4 Мпк распределение видимого вещества Вселенной является сильно неоднородным. Средняя плотность материи в галактиках приблизительно в $10^5$–$10^6$ раз больше, чем усреднённая по наблюдаемой части Вселенной. В скоплениях галактик она в разы больше, чем средняя во Вселенной [19; 27].

Из анализа наблюдаемого движения звёзд и газопылевых облаков в галактиках и в их скоплениях был сделан вывод о том, что кроме видимой материи в них в большом количестве присутствует и другая, непосредственно не наблюдаемая тёмная материя. С учётом этой материи стало возможным объяснение, в рамках существующей теории гравитации, наблюдаемого движения объектов в галактиках и их скоплениях. Было показано, что количество невидимой материи в галактиках и их скоплениях в 5–6 раз превосходит количество видимой материи. Оказалось, что тёмная материя в основном находится на периферии галактик и их скоплений, а не в их центре. Предполагалось, что тёмная материя содержится в звёздах слабой светимости.

На основе анализа больших массивов наблюдательных данных было убедительно доказано, что распределение галактик и скоплений галактик, на размерах 100–300 Мпк и бóльших, является однородным, а их угловое распределение на небесной сфере изотропным. Последнее утверждение было названо английским астрофизиком Милном Космологическим принципом. Этот принцип является основополагающим в теоретической космологии [11; 19; 27]. Считается, что на больших масштабах Вселенная однородна и изотропна для любого типичного наблюдателя, «вмороженного» в расширяющуюся космическую среду. В космологии обычно считается, что необходимым условием разумности любой теоретической модели Вселенной должно являться её согласие с этим принципом. Как отмечал С. Вайнберг [12], его выполнение удовлетворительно с философской точки зрения: действительно, почему какая-то часть Вселенной или какое-то направление в ней должны отличаться от любых других?

В космологии исследование динамики Вселенной проводится в рамках механики сплошных сред. Считается, что Вселенная непрерывно и однородно заполнена материей. Обычно предполагают, что космическая среда идеальна. Термодинамическими функциями, определяющими её свойства, являются плотность энергии $\varepsilon$, давление $P$, температура $T$, а также плотность энтропии $S$ [11; 19; 27; 46]. Считается, что в однородной изотропной расширяющейся Вселенной эти функции зависят лишь от времени.

Предполагалось, что на космологических масштабах пространственные распределения невидимой тёмной материи и видимой барионной материи являются аналогичными. С учётом этого, утверждалось, что об однородности Вселенной можно говорить лишь на масштабах, бóльших, чем 100–300 Мпк [19; 27;]. В то же время отмечалось, что, возможно, это не так и однородность в распределении космической среды имеет место на существенно меньших масштабах. Это утверждение косвенно подтверждали трудоёмкие и обширные исследования Сэндиджа и его сотрудников [103]. Они убедительно доказали, что хаббловский закон расширения выполняется начиная уже приблизительно с 10 Мпк. Это косвенно доказывало, что на таких масштабах современная Вселенная является практически однородной.

На это указывали и достаточно точные измерения расстояний и допплеровских сдвигов для объектов в окрестности Местного скопления. Они показали, что здесь хаббловский закон расширения выполняется начиная уже с масштабов $\geqslant$1,5 Мпк [70]. Чтобы понять, почему Вселенная в реальности значительно более однородна, чем следует из наблюдений распределения видимой материи, стали предполагать, что, вероятно, вовсе не эта материя является главным фактором, определяющим динамику Вселенной [18; 19; 70].

Веским аргументом в пользу утверждения об однородности и изотропности Вселенной является реликтовое излучение [11; 19; 27]. Было убедительно доказано, что Вселенная однородно заполнена газом невзаимодействующих фотонов, имеющих планковский спектр (рис. 8.1), характеризуемый температурой $T_0 = 2{,}725 \pm 0{,}001$ К. Температура этого излучения, приходящего с разных направлений на небесной сфере, практически одинакова. Считается, что этот наблюдательный факт является одним из важных свидетельств однородности и изотропности Вселенной [11; 12; 19; 27].

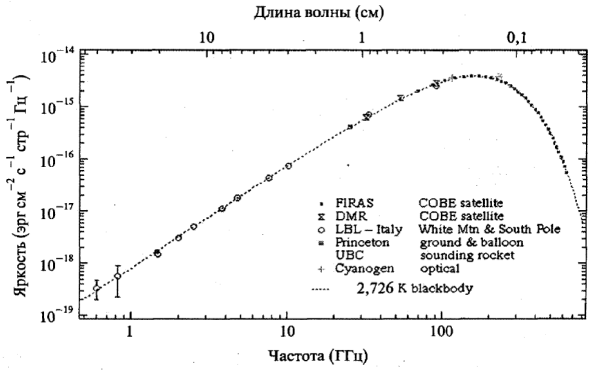



*Рис. 8.1. Спектр реликтового излучения. Компиляция выполнена в [88]. Штриховой линией показан планковский спектр, соответствующий температуре 2,726 К*

Из наблюдений следовало, что в современной Вселенной плотность энергии реликтового излучения на 3–4 порядка меньше, чем плотность энергии видимой барионной компоненты космической среды. Теория показывала, что наряду с реликтовым излучением Вселенная однородно заполнена ещё и нейтринной компонентой. Вклады фотонов и различных видов нейтрино и антинейтрино в полную плотность энергии космической среды соизмеримы [19; 27].

Учитывая малость вкладов фотонов и нейтрино в полную плотность энергии современной Вселенной, понимали, что не они ответственны за поддержание хаббловского закона её расширения на масштабах, где явно проявляется неоднородность в распределении барионной компоненты космической среды.

Теоретические исследования динамики Вселенной проводились в рамках общей теории относительности. Предполагалось, что космическая среда состоит из барионной компоненты, тёмной материи, реликтового излучения и нейтринной компоненты. Было показано несоответствие теории и наблюдений. Согласно теории между всеми частицами компонент космической среды действуют силы гравитационного притяжения, что должно приводить к замедлению

скорости расширения Вселенной. Этот вывод не позволял в рамках ОТО объяснить наблюдаемую динамику Вселенной, поскольку необходимо было считать, что Вселенная уже более 7 млрд лет расширяется не с замедлением, а с ускорением. Продолжая верить в правильность общей теории относительности, стали предполагать, что наряду с известными компонентами космической среды существует ещё и необычная материя, названная тёмной энергией. Она в отличие от обычных материй создаёт не замедление, а увеличение скорости расширения Вселенной.

Осознание необходимости введения в космологию, наряду с силами притяжения, сил отталкивания привело к кардинальному изменению ранее существовавших представлений о составе космической среды. В следующем пункте дадим краткое описание существующих в современной космологии представлений о составе и пространственном распределении космической среды.

## 8.2. Современные представления

Согласно утвердившимся в настоящее время представлениям космическая среда современной Вселенной состоит из следующих компонент [19; 70]:

– гипотетической вакуумной формы материи, называемой тёмной энергией. Обычно считается, что её макроскопические свойства описываются $\Lambda$-членом уравнений Эйнштейна (см. гл. 13 и 14);

– «барионной компоненты», состоящей из протонов, нейтронов, а также содержащих их ядер. Эта компонента включает в себя также электроны, обеспечивающие её электронейтральность;

– гипотетической «тёмной материи» – компоненты космической среды, состоящей, как сейчас предполагают, вовсе не из слабо светящихся звёзд, а из массивных слабо взаимодействующих нерелятивистских стабильных элементарных частиц, состав которых пока не является достоверно установленным. В литературе для их обозначения часто используется аббревиатура WIMPs (W – Weakly, I – Interacting, M – Massive, P – Particles) [18; 19];

– «релятивистской компоненты», состоящей из частиц, масса покоя которых много меньше их кинетической энергии. В современной Вселенной этими частицами являются фотоны и нейтрино.

В процессе расширения Вселенной соотношение вкладов различных компонент космической среды в её полную энергию непрерывно менялось. Считается, что в современной Вселенной приблизительно 73 % энергии содержится в тёмной энергии, 23 % в тёмной материи и 4 % в барионной компоненте. Современный вклад релятивистской компоненты в полную энергию космической среды мал и оценивается на уровне $10^{-4}$–$10^{-3}$ от вклада барионной компоненты [19; 70].

В физическую теорию частицы и античастицы входят равноправно. Было высказано предположение, что во Вселенной они должны присутствовать в равных количествах (П. А. М. Дирак, 1933 г.). В то же время на основании множества наблюдательных данных в современной космологии утвердилось мнение: антивещества в современной Вселенной в заметных количествах нет. Считается, что Вселенная состоит из «лишних» барионов, возникших на ранних стадиях её эволюции. Предполагают, что ещё в ранней Вселенной на каждый миллиард парных барионов/антибарионов возник приблизительно один «лишний» барион. Считается, что в процессе расширения Вселенной и её остывания весь симметричный мир пар частиц-античастиц проаннигилировал, остались лишь те барионы, для которых не нашлось партнёров, а также соответствующее им количество электронов, и, следовательно, современная Вселенная состоит лишь из вещества.

В современной космологии существуют следующие представления о пространственном распределении компонент космической среды во Вселенной.

Считается, что тёмная энергия распределена во Вселенной однородно на любых масштабах. Предполагают, что она является источником космологических сил отталкивания, описываемых $\Lambda$-членом уравнений Эйнштейна (см. гл. 13 и 14). При этом её рассматривают как идеальную однородную среду, имеющую во всех локально-инерциальных системах отсчёта одинаковую, не меняющуюся во времени и пространстве плотность:

$$\rho_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{8\pi G}, \tag{8.1}$$

где $G$ – гравитационная постоянная, $c$ – скорость света, $\Lambda$ – космологическая постоянная, причём $\Lambda > 0$. Тёмная энергия является средой с отрицательным давлением. Уравнение состояния этой среды имеет вид

$$P_\Lambda = -\varepsilon_\Lambda = -\rho_\Lambda c^2. \tag{8.2}$$

Пространственное распределение барионной компоненты на малых масштабах является сильно неоднородным. На масштабах $\leqslant$1–4 Мпк наблюдаются гравитационно-связанные структуры, состоящие из этой компоненты (галактики и их скопления). Средняя плотность этих структур значительно больше, чем плотность космической среды, усреднённая по масштабам более 100 Мпк. Например, средняя плотность космической среды в типичных галактиках в $10^5$–$10^6$ раз больше, чем средняя плотность космической среды во Вселенной [19; 27].

За последние двадцать лет представления о пространственном распределении барионной компоненты кардинально изменились. Если раньше считалось, что подавляющая её часть содержится в звёздах [29; 30; 61; 72],

то в настоящее время утверждается, что в них содержится не более 10 % этой компоненты. Считается, что не менее 90 % барионной компоненты заключено в межгалактических облаках водород-гелиевой плазмы, имеющей температуру $T \geqslant 10^5$–$10^6$ K [19].

Согласно существующим представлениям, в барионной компоненте космической среды содержится не более 4 % всей массы современной Вселенной, при этом «звёздная» часть Вселенной заключает в себе не более 0,4 % всей массы космической среды. Тридцать-сорок лет назад убедительно доказывали, что эта часть составляет более 97 %.

Считается, что на космологических масштабах распределение барионной компоненты является однородным. Отклонения от однородности в распределении этой компоненты на масштабах, бóльших 100 Мпк, оценивается на уровне 0,1–1 % [27]. Часто в современных космологических моделях барионную компоненту рассматривают как холодную идеальную пылевидную среду. В космологии это приближение считается хорошим при описании эпох эволюции Вселенной, когда космическая среда стала достаточно холодной, а барионная компонента термодинамически независимой от радиационной компоненты. Считается, что это произошло при уменьшении температуры космической среды до значений 3 100–3 000 K. В это время барионная компонента из состояния плазмы перешла в газообразное состояние. Этот период в эволюции Вселенной определяют как эпоху рекомбинации [19; 27].

В современной космологии широко распространено мнение, что, как и барионы, частицы тёмной материи, за исключением самых ранних эпох эволюции Вселенной, являются нерелятивистскими и их пространственные распределения на космологических масштабах предлагаются аналогичными. В космологических моделях их часто объединяют в одну нерелятивистскую пылевидную компоненту. Учитывается, что это приближение не всегда является хорошим. Например, в задачах об образовании структур во Вселенной оно неверно.

Из анализа наблюдений следует, что распределения барионной компоненты и тёмной материи в галактиках и их скоплениях существенно отличаются друг от друга [18; 19]. В процессах образования структур, барионная компонента является диссипативной, в то же время в тёмной материи диссипация практически не имеет места. Считается, что это главная причина, обусловливающая различие в пространственном распределении барионной компоненты и тёмной материи в гравитационно-связанных структурах. Первая из них накапливается в областях минимумов потенциальных ям гравитационных полей, тогда как вторая имеет наибольшую плотность в областях их максимумов, где скорость захваченных «тёмных» частиц мала. Наоборот, в областях минимумов потенциальных ям гравитационных полей слабовзаимодействующие частицы тёмной материи имеют максимальную скорость, и там их плотность минимальна.

Считается, что распределение релятивистской компоненты космической среды во Вселенной является почти однородным и изотропным. Наблюдаемые отклонения плотности потока реликтового излучения от его среднего значения не превышают сотых долей процента. В современной космологии предполагают, что пространственные распределения нейтринной и фотонной компонент космической среды являются одинаковыми [19; 27; 59].

Описанные современные представления о составе и пространственном распределении космической среды вызывают множество вопросов. Озвучим лишь два из них.

1. Почему Вселенная однородна и изотропна?

2. Почему в современной Вселенной вклады различных компонент космической среды – барионной компоненты, тёмной материи и тёмной энергии – в полную плотность энергии космической среды имеют один порядок?

Чтобы дать ответ на эти вопросы, в современной космологии принимается ещё ряд гипотез, объединяемых в то, что определяется как теория инфляции. Наряду с ранее введёнными гипотетическими сущностями (тёмной энергией и тёмной материей) вводят новую гипотетическую сущность – инфлантонное поле. Подгоночных параметров становится больше [18; 19], а теория ещё менее определённой и красивой.

Учитывая вышеизложенное, вполне уместно задать следующий вопрос: «Являются ли существующие представления о космической среде и её распределении во Вселенной окончательно установленными или, как и представления прошлого века, создают лишь иллюзию понимания реальной картины?» В настоящей книге авторы пытаются ответить на этот вопрос.

В следующем пункте приведём описание состава космической среды, предполагаемого в двузнаковой гравитации.

## 8.3. Космическая среда гравитационно-нейтральной Вселенной

В наших работах, посвященных гравитации и космологии, показано, что есть основание сомневаться в том, что современная теория гравитации (ОТО) правильно описывает гравитационное взаимодействие вещества с антивеществом, а также гравитационные свойства вакуума [32–43; 92; 93].

ОТО не различает частицы и античастицы. Возможно, это не так, и в реальности между частицами и античастицами существует не тяготение, а антитяготение. В монографии изложена суть предлагаемой авторами двузнаковой гравитации, различающей частицы и античастицы. В этой теории предполагается существенно другой, чем в современной космологии, состав космической среды. Считается, что она состоит из вакуума и того, что реально наблюдается в физических лабораториях и содержится в стандартной модели частиц. Как

показывают исследования, этого оказывается достаточно, чтобы описать наблюдаемую динамику Вселенной (см. гл. 18).

Согласно двузнаковой гравитации космическая среда состоит из обычной и вакуумной материй. Обычная материя включает в себя две компоненты: нерелятивистскую и релятивистскую. Считается, что Вселенная симметрична по частицам и античастицам, как реальным, так и виртуальным. Предполагается, что у каждой частицы, в том числе и у фотона, существует античастица. Между частицами и античастицами существует не тяготение, а антитяготение.

Нерелятивистская (барионная) компонента состоит из протонов, нейтронов и электронов, а также их античастиц. Релятивистская компонента включает в себя реликтовое излучение, состоящее из фотонов и антифотонов, и нейтринную компоненту, состоящую из трёх поколений нейтрино и соответствующих им антинейтрино.

Вакуумной материей является то, что составляет физический вакуум. Предполагается, что он – главная компонента космической среды. Вакуум однородно заполняет Вселенную и является не только электро-, но и гравитационно-нейтральным. Частицы и античастицы являются его возбуждёнными состояниями: частицы – состояниями с положительной энергией, а античастицы – с отрицательной.

В двузнаковой гравитации вакуум рассматривается как идеальная электро- и гравитационно-нейтральная сплошная среда, уравнение состояния которой

$$P = -\frac{1}{3}\varepsilon, \tag{8.3}$$

где $P$ – давление, а $\varepsilon$ – плотность энергии этой среды. Вакуум выделяет привилегированную систему отсчёта.

Фотоны и антифотоны, нейтрино и антинейтрино однородно заполняют Вселенную. В них содержится пренебрежимо малая часть энергии современной Вселенной.

Распределение барионной (нерелятивистской) компоненты космической среды во всей наблюдаемой части Вселенной является неоднородным. В гл. 25 показано, что возникновение структур в барионной компоненте связано с распадом ранней Вселенной на миры и антимиры – области, содержащие лишь барионы и антибарионы соответственно.

Согласно двузнаковой гравитации, миры и антимиры являются самыми крупными неоднородностями Вселенной. В процессе её расширения каждый из миров и антимиров распался на множество более мелких фрагментов (звёзды, галактики, скопления галактик, межгалактические облака горячей плазмы и др.) В то же время есть основание предполагать, что миры и антимиры, а также структуры, из которых они состоят, являются лишь «мелкой рябью»

в однородном море электро- и гравитационно-нейтрального физического вакуума (см. гл. 20).

Предполагать существование тёмной материи и тёмной энергии в двузнаковой гравитации нет необходимости. На это указывают следующие соображения.

Динамику Вселенной, а также наблюдаемые распределения гравитационных полей на периферии галактик и их скоплений можно объяснить, не используя эти гипотетические материи (см. гл. 18 и 27). В квантовой теории в явном виде не содержится указаний на существование этих материй. Их введение в значительной степени связано с желанием оставить неизменными основополагающие принципы общей теории относительности. В настоящей книге показано, что, возможно, для этого нет достаточных оснований.

В двузнаковой гравитации в состав космической среды входит лишь то, что наблюдается в реальных экспериментах.

# ГЛАВА 9

# КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВСЕЛЕННОЙ

Описание динамики Вселенной основано на существующих знаниях о составе космической среды, а также законах, определяющих физические свойства и взаимодействия её компонент. Центральным пунктом такого описания является космологическая модель Вселенной, содержащая схематизированное описание наиболее важных её элементов. Она основана на существующем понимании главных факторов, определяющих закономерности наблюдаемых во Вселенной процессов. Космологическая модель является исходной для решения множества конкретных задач о процессах во Вселенной. Она лежит в основе исследований строения и эволюции Вселенной, используется при их планировании.

Важнейшими факторами, учитываемыми в космологических моделях Вселенной, являются её однородность и изотропность. Учитывается также, что Вселенная расширяется. Наблюдения убедительно доказывают, что расширение является изотропным. В современной космологии считается, что оно началось конечное время назад из состояния колоссальной плотности, давления и температуры. Относительная скорость, с которой удаляются друг от друга достаточно далёкие объекты, описывается законом Хаббла.

В основе современной космологической модели Вселенной лежит описанное в п. 8.2 представление о компонентном составе космической среды и вера в применимость общей теории относительности для описания её динамики на космологических масштабах. Соответствующую модель в космологии обычно называют стандартной, часто ΛCDM-моделью [19; 70]. Для объяснения наблюдений в эту модель вводятся гипотетические сущности (тёмная материя, тёмная энергия, инфлантонное поле). Понимание их природы в рамках современной физической теории отсутствует.

Предполагаем, что отмеченные недостатки ΛCDM-модели связаны с ошибочностью некоторых её положений. Сомневаемся в правильности двух из них, лежащих в основе этой модели.

1а. Гравитация не различает частицы и античастицы. Современная Вселенная состоит лишь из частиц.

2а. Динамику Вселенной определяет гравитационное поле. Его источником является материя, имеющая сложный компонентный состав. В процессе эволюции Вселенной материя претерпевает кардинальные изменения. Космологическое ускорение, с которым происходит увеличение масштаба Вселенной, является сложной функцией времени. Определяющую роль в динамике современной Вселенной играет тёмная энергия, и её роль со временем будет непрерывно возрастать.

Считаем, что в реальности правильными являются не эти предположения, а альтернативные им.

1б. Гравитация различает частицы и античастицы, и Вселенная содержит их в равном количестве. Между частицами и античастицами существует антитяготение.

2б. Динамику Вселенной определяет гравитационно-нейтральная материя, не создающая её ускоренного расширения. Вселенная является гравитационно-нейтральной и за исключением самых ранних эпох её эволюции расширяется равномерно. Знание деталей состава космической среды и законов его изменения не является необходимым для решения задачи расчёта глобальной динамики Вселенной.

Космологическая модель Вселенной, основанная на этих предположениях и описываемая в рамках двузнаковой гравитации, определяется как S-модель.

Главной компонентой космической среды в двузнаковой гравитации является вакуум. Частицы и античастицы являются его возбуждёнными состояниями: частицы – состояниями с положительной энергией, античастицы – с отрицательной энергией. На космологических масштабах Вселенная не только электро-, но и гравитационно-нейтральна. Наблюдаемая барионная асимметрия окружающего нас мира создаёт лишь иллюзию нарушения симметрии Вселенной по частицам и античастицам. В рамках двузнаковой гравитации будет показано, что это нарушение не является свойством Вселенной в целом.

В этой части книги приводится описание двух космологических моделей Вселенной: ΛCDM-модели, основанной на эйнштейновской теории гравитации и существующих представлениях о составе космической среды, и S-модели – основанной на двузнаковой гравитации и предположении о гравитационной нейтральности Вселенной. Проведён сравнительный анализ эффективности этих моделей в объяснении наблюдаемой динамики Вселенной.

Ниже приведена необходимая информация, используемая для получения уравнений, описывающих динамику Вселенной в рамках ΛCDM- и S-моделей.

# ГЛАВА 10

# УРАВНЕНИЯ ЭЙНШТЕЙНА

Современной теорией гравитации является общая теория относительности (ОТО). При её создании, основываясь на экспериментальных данных, Эйнштейн считал, что гравитационные поля обладают следующим универсальным свойством: все тела, вне зависимости от их природы и состояния движутся в этих полях при заданных начальных условиях одинаковым образом. Учитывая это, он полагал, что существует полная аналогия между движением тел в гравитационном поле и движением тел, не находящихся в каком-либо внешнем поле, но рассматриваемых с точки зрения неинерциальной системы отсчёта. В ОТО считается, что неинерциальная система отсчёта эквивалентна некоторому фиктивному гравитационному полю (принцип эквивалентности).

В инерциальных системах отсчёта квадрат интервала между двумя бесконечно близкими событиями записывается в виде [46]:

$$ds^2 = g_{ik} dx^i dx^k. \tag{10.1}$$

Здесь и далее индексы $i$, $j$, $k$ принимают значения 0, 1, 2, 3. Используется правило суммирования Эйнштейна по дважды повторяющимся индексам.

При использовании декартовых пространственных координат $x^1 = x$, $x^2 = y$, $x^3 = z$ и времени $x^0 = ct$ компоненты метрического тензора $g_{ik}$ оказываются равными

$$g_{00}^{(0)} = 1, \quad g_{11}^{(0)} = g_{22}^{(0)} = g_{33}^{(0)} = -1, \quad g_{ik}^{(0)} = 0 \quad \text{при} \quad i \neq k. \tag{10.2}$$

При переходе к любой другой инерциальной декартовой системе отсчёта (то есть при преобразованиях Лоренца) компоненты метрического тензора сохраняют вид (10.2).

Если перейти в неинерциальную систему отсчёта, то в квадрате интервала (10.1) компоненты метрического тензора будут некоторыми функциями пространственно-временных координат. При этом отличными от нуля оказываются не только его диагональные компоненты. Это означает, что в неинерциальных системах отсчёта четырёхмерная система координат $x^0$, $x^1$, $x^2$, $x^3$ является криволинейной. Величины $g_{ik}$ полностью определяют геометрические свойства криволинейной системы координат (часто говорят: устанавливают её метрику).

Квадрат интервала $ds^2$ является инвариантом. Величина $g_{ik}$ является тензором второго ранга [46]. Обычно считается, что метрический тензор $g_{ik}$ является симметричным, имеющим десять различных компонент.

Поскольку в ОТО неинерциальные системы отсчёта эквивалентны гравитационным полям, то считается, что эти поля определяются величинами $g_{ik}$. Гипотетически предполагают, что не только фиктивные гравитационные поля, обусловленные неинерциальностью систем отсчёта, но и «истинные», источниками которых является материя, связаны с переменностью метрики пространства-времени и её отличием от метрики (10.2). Величины $g_{ik}$ являются потенциалами гравитационного поля. В гравитационном поле геометрия пространства-времени является неевклидовой.

Истинное гравитационное поле не может быть полностью исключено никаким преобразованием координат. При наличии этого поля пространство-время таково, что определяющие его метрику величины $g_{ik}$ никаким преобразованием координат не могут быть приведены во всём пространстве к виду (10.2). Такое пространство-время называют искривлённым в отличие от плоского, в котором указанное приведение возможно.

В общей теории относительности считается, что метрические коэффициенты $g_{ik}$ зависят от распределения материи и характера движения частиц, её составляющих. Величиной, являющейся источником гравитационного поля, является тензор энергии-импульса $T_{ik}$ материи. Взаимосвязь между компонентами метрического тензора $g_{ik}$ и компонентами тензора энергии-импульса $T_{ik}$ определяется уравнениями Эйнштейна [11; 19; 27; 46]

$$B_i^k = R_i^k - \frac{1}{2}\delta_i^k R = \frac{8\pi G}{c^4} T_i^k, \tag{10.3}$$

где $B_i^k$ – тензор Эйнштейна, $R_i^k$ – тензор Риччи, $R$ – его след, $\delta_i^k$ – символ Кронекера.

Тензор Риччи имеет вид

$$R_i^k = g^{ks} R_{is} = g^{ks}\left(\frac{\partial \Gamma_{is}^l}{\partial x^l} - \frac{\partial \Gamma_{il}^l}{\partial x^s} + \Gamma_{is}^l \Gamma_{lm}^m - \Gamma_{il}^m \Gamma_{sm}^l\right). \tag{10.4}$$

Символы Кристоффеля $\Gamma_{ik}^l$ определяются формулой

$$\Gamma_{ik}^l = g^{lm}\Gamma_{m,ik} = \frac{1}{2} g^{lm}\left(\frac{\partial g_{mi}}{\partial x^k} + \frac{\partial g_{mk}}{\partial x^i} - \frac{\partial g_{ik}}{\partial x^m}\right). \tag{10.5}$$

Уравнения Эйнштейна записаны в тензорной ковариантной форме. Их вид в любых системах отсчёта одинаков. В то же время это не означает эквивалентности всех систем отсчёта. Свойства физических явлений в различных системах отличаются. При решении каждой конкретной задачи целесообразно использовать ту систему отсчёта, в которой достигается максимально простое описание рассматриваемого явления.

Дивергенция тензора энергии-импульса равна нулю [46. § 95]

$$T_{i;k}^k = 0, \tag{10.6}$$

поскольку тождественно равна нулю дивергенция тензора Эйнштейна [46. § 92]:

$$B^k_{i;k} = 0. \tag{10.7}$$

Учитывая (10.3) и (10.7), заключаем, что уравнения (10.6) содержатся в уравнениях Эйнштейна. Уравнение (10.6), выражая законы сохранения энергии и импульса обычной материи, содержит в себе уравнение её движения.

В общей теории относительности геометрические свойства пространства-времени, распределение и физические свойства материи являются согласованными. Задание распределения материи и её параметров определяет, какой должна быть метрика пространства-времени, а та в свою очередь определяет, как должна двигаться материя и как при этом будут меняться её параметры.

В ОТО гравитация является следствием искривлённости пространства-времени. Кратчайшими линиями в искривлённом пространстве-времени являются геодезические. Тела в пространстве-времени движутся по ним. При заданных начальных условиях они попадают на одну и ту же геодезическую и движутся одинаково.

Левая часть уравнений Эйнштейна описывает геометрические свойства пространства-времени, правая часть – физические свойства материи и её движение. Считается, что все виды материи являются источниками искривлённости пространства-времени. ОТО не различает частицы и античастицы. В этой теории вклады всех компонент космической среды в тензор энергии-импульса суммируются.

Эйнштейн полагал, что запись левой части уравнения для гравитационного поля в виде тензора $B_{ik}$ содержит в себе минимум произвола. Кроме этого тензора нет другого тензора 2-го ранга, который был бы составлен из метрического тензора $g_{ik}$ и его производных, не содержал бы производных более высокого порядка, чем второй, и был бы линейным относительно последних.

Поскольку $T^k_i$ – тензор энергии-импульса обычной космической среды, то, учитывая (10.6), (10.7), естественно считать, что величина

$$G^k_i = -\frac{c^4}{8\pi G} B^k_i \tag{10.8}$$

является тензором энергии-импульса гравитационного поля (искривлённого вакуума-пространства-времени). В этом случае закон сохранения энергии и импульса для материи в целом, включающей в себе и гравитационное поле, запишется в виде

$$(G^k_i + T^k_i)_{;k} = 0. \tag{10.9}$$

Уравнение (10.9), как закон сохранения энергии-импульса для материи в целом, в рамках ОТО не рассматривается. Учитывается, что согласно уравнениям Эйнштейна все компоненты тензора энергии-импульса $G_i^k + T_i^k$ должны быть равными нулю. В рамках однознаковой по энергии общей теории относительности понять и объяснить, почему во всех точках Вселенной и во все моменты времени полная энергия всех видов материи (обычной и вакуумной) должна быть равной нулю, невозможно.

В двузнаковой гравитации, в которой предполагается, что гравитация различает частицы и античастицы и гравитационные заряды связаны с энергией, содержится существенное изменение представления об энергии. Энергия является «двузнаковой». В рамках этой теории может быть дано простое и ясное толкование закона сохранения (10.9) (см. гл. 16).

Настоящая книга, в значительной степени посвящена проблемам космологии. В космологии космическую среду обычно описывают как непрерывную идеальную сплошную среду, записывая тензор энергии-импульса в форме

$$T_i^k = (\varepsilon + P)u_i u^k - P\delta_i^k, \tag{10.10}$$

где $u_i$ – четырёхмерная скорость макроскопического движения среды, $\varepsilon$ и $P$ – плотность энергии и давление космической среды соответственно.

В заключение этой главы, в связи с обсуждаемой в монографии двузнаковой гравитацией, выскажем некоторые замечания об общей теории относительности.

Уже в течение почти ста лет предпринимаются безуспешные попытки объединения ОТО и квантовой теории. Есть основания предполагать, что трудности объединения этих двух великих физических теорий XX в. связаны не с математическими сложностями, как об этом часто думают [11; 19; 27], а с противоречием их основополагающих идей.

Полагаем, что главное противоречие этих теорий состоит в том, что квантовая теория различает частицы и античастицы, а ОТО их не различает. В общей теории относительности энергия, являющаяся источником гравитационного поля, считается однознаковой. В то же время в квантовой теории двузнаковость энергии и связанное с этим принципиальное различие частиц и античастиц (см. п. 2.6), лежит в основе этой теории.

Согласно двузнаковой гравитации ОТО является ограниченной теорией. Она не различает частицы и античастицы и вследствие этого неправильно описывает их гравитационное взаимодействие, а также гравитационные свойства вакуума.

Современная теория гравитации не различает частицы и античастицы. Это является, как мы полагаем, причиной фундаментальных трудностей этой теории. Назовём лишь две из них.

В ОТО оказываются приемлемыми сингулярные решения, поскольку не существует разумного способа их устранения. Примером этих решений являются чёрные дыры.

Для объяснения в рамках этой теории наблюдаемой динамики космической среды на галактических и бóльших масштабах приходится вводить гипотетические среды (тёмную материю и тёмную энергию). Нет простого и убедительного объяснения их физической природы, подтверждённого в экспериментах и наблюдениях.

Считаем, что в правильной теории гравитации эти трудности должны отсутствовать. Для нас это является важным аргументом в пользу необходимости развития идей двузнаковой гравитации.

# ГЛАВА 11
# ГЕОМЕТРИЯ ОДНОРОДНОЙ ИЗОТРОПНОЙ ВСЕЛЕННОЙ

## 11.1. Однородные изотропные гиперповерхности

Для описания геометрии однородного изотропного нестационарного трёхмерного пространства Вселенной удобно исходить из геометрической аналогии, рассматривая это пространство как однородную и изотропную трёхмерную гиперповерхность в некотором фиктивном четырёхмерном евклидовом пространстве [46]. В этом пространстве могут быть стандартным образом введены четырёхмерные декартовы сферические и другие системы координат.

Уравнение, описывающее нестационарную однородную и изотропную трёхмерную гиперповерхность в четырёхмерных декартовых координатах ($x_1$, $x_2$, $x_3$, $x_4$), имеет вид

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 = ka^2\left(t\right). \tag{11.1}$$

Параметр $k$ может принимать три значения: +1, –1, 0. При $k = +1$ реализуется случай пространства положительной кривизны. Значению $k = -1$ соответствует пространство отрицательной кривизны. Плоское пространство нулевой кривизны имеет место при $k = 0$. Точка $O$ с координатами (0; 0; 0; 0) является центром гиперповерхности. Величину $a(t)$ часто называют «радиусом кривизны» пространства. В нестационарной Вселенной радиус кривизны изменяется во времени. Рассмотрим геометрические свойства пространств с $k = +1, -1, 0$ в отдельности.

## 11.2. Сферическое пространство

При $k = +1$ пространство однородной и изотропной Вселенной является трёхмерной гиперсферой. Для описания геометрии этой поверхности удобно использовать четырёхмерную сферическую систему координат ($a$, $\chi$, $\theta$, $\phi$). В этой системе центр Вселенной – точка, где $a = 0$. Связь между четырёхмерными декартовыми и сферическими координатами определяется следующими формулами:

$$\begin{aligned} x_1 &= a\sin\chi\sin\theta\cos\phi, \\ x_2 &= a\sin\chi\sin\theta\sin\phi, \\ x_3 &= a\sin\chi\cos\theta, \\ x_4 &= a\cos\chi. \end{aligned} \tag{11.2}$$

Допустимые интервалы изменения сферических координат

$$0 \le a < \infty,\ 0 \le \chi \le \pi,\ 0 \le \theta \le \pi,\ 0 \le \phi \le 2\pi. \qquad (11.3)$$

Для описания сферической Вселенной используем также трёхмерную криволинейную сопутствующую систему координат. Будем называть её системой координат типичных наблюдателей. Типичный наблюдатель – это абстрактный объект Вселенной, находящийся на трёхмерной гиперповерхности и совершающий относительно её центра в четырёхмерной сферической системе координат лишь радиальное движение. Система типичных наблюдателей – это бесконечное их множество, однородно заполняющее трёхмерное пространство Вселенной.

Временную координату выберем так, чтобы в сопутствующей системе координат для любого типичного наблюдателя интервал между двумя бесконечно близкими событиями, происходящими в точке, где он находится, определялся формулой

$$ds^2 = c^2\, dt^2. \qquad (11.4)$$

В силу равноправности всех типичных наблюдателей введённое так время будет одинаковым для всех этих наблюдателей, и поэтому его называют мировым.

Динамику Вселенной будем изучать относительно одного из типичных наблюдателей. Этого типичного наблюдателя будем называть главным. В силу равноценности всех типичных наблюдателей любой из них может быть главным. Выберем четырёхмерную сферическую систему координат так, чтобы главный типичный наблюдатель ($\bar{M}$) находился на «северном» полюсе этой системы координат.

Для описания движения произвольного типичного наблюдателя ($M$) в сопутствующей системе координат относительно главного ($\bar{M}$) удобно использовать сопутствующую трёхмерную систему координат. В этой системе, по определению, координатами точки являются ($\chi$, $\theta$, $\phi$), причём расстояние от $\bar{M}$ до $M$ $R(t) = a(t)\chi$. Масштабный фактор $a(t)$ описывает однородное и изотропное растяжение-сжатие сопутствующей трёхмерной системы координат.

Считаем, что в процессе эволюции Вселенной однородность и изотропность её трёхмерного пространства сохраняется. При выполнении этого условия произвольный типичный наблюдатель движется только вдоль радиальной координаты четырёхмерной сферической системы координат. Уравнения его движения в этой системе следующие:

$$a = a(t),\quad \chi(t) = \chi_0,\ \theta(t) = \theta_0,\ \phi(t) = \phi_0. \qquad (11.5)$$

Сферические координаты $M$ в начальный момент времени $t = t_0$

$$a(t_0) = a_0, \quad \chi(t_0) = \chi_0, \ \theta(t_0) = \theta_0, \ \phi(t_0) = \phi_0. \tag{11.6}$$

Величина $t$ определяет время в четырёхмерной сферической системе координат.

В сопутствующей системе движение типичного наблюдателя относительно главного определяется уравнениями

$$R(t) = a(t)\chi_0, \quad \chi(t) = \chi_0, \ \theta(t) = \theta_0, \ \phi(t) = \phi_0 . \tag{11.7}$$

Это движение подчиняется закону Хаббла:

$$\frac{dR(t)}{dt} = H(t)R(t), \tag{11.8}$$

где $H(t)$ – параметр Хаббла, одинаковый для любых $R(t)$:

$$H(t) = (da / dt) / a. \tag{11.9}$$

Закон Хаббла является «внутренним» законом, определяющим характер движения произвольного типичного наблюдателя относительно главного. Он – следствие сохранения однородности и изотропности Вселенной в процессе её эволюции.

Сферическое трёхмерное пространство является неевклидовым. Если ($\chi$, $\theta$, $\phi$) и $(\chi + d\chi, \theta + d\theta, \phi + d\phi)$ – координаты двух бесконечно близких точек в сопутствующей системе координат, то квадрат пространственного расстояния между ними

$$dl^2 = a^2 \left\{ d\chi^2 + \sin^2\chi \left[ \sin^2\theta \left(d\phi\right)^2 + \left(d\theta\right)^2 \right] \right\}. \tag{11.10}$$

Интервал между двумя бесконечно близкими событиями в сопутствующей системе координат, с учётом (11.4), (11.10), запишется в виде

$$ds^2 = c^2 dt - a^2(t) \left\{ d\chi^2 + \sin^2\chi \left[ \sin^2\theta \left(d\phi\right)^2 + \left(d\theta\right)^2 \right] \right\}. \tag{11.11}$$

Длина окружности радиуса $R = a\chi$ равна $L = 2\pi\, a \sin\chi$. Отношение длины окружности к радиусу $L/R = 2\pi(\sin\chi)/\chi < 2\pi$. Площадь двумерной поверхности сферы радиуса $R = a\chi$ равна

$$S\left(R\right) = a^2 \sin^2\chi \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} \sin^2\theta d\theta = 4\pi a^2 \sin^2\left(R/a\right). \tag{11.12}$$

Радиус сферы $R$ может меняться в пределах: $0 \leqslant R \leqslant \pi a$. При $R = 0$ имеет $S(0) = 0$. Сначала с ростом $R$ величина $S(R)$ растёт и при $R = (\pi/2)a$ достигает максимума $S_{\max} = 4a^2\pi$. При дальнейшем росте $R$ величина $S(R)$ уменьшается и при $R = \pi a$ обращается в ноль.

Объём пространства однородной изотропной сферической Вселенной определяется формулой

$$V = a^3 \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} \sin\theta d\theta \int_0^{\pi} \sin^2\chi d\chi = \int_0^{\pi} S(R) a d\chi = 2\pi^2 a^3 . \qquad (11.13)$$

## 11.3. Пространство отрицательной кривизны

Формулы, описывающие геометрию однородного пространства отрицательной кривизны, получаются из формул, описывающих сферическую Вселенную, если в них формально заменить $a \to ai$, $\chi \to i\chi$, где $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица. При $k = -1$ уравнение (11.11) описывает трёхмерную псевдосферу с мнимым радиусом.

Удобными для описания псевдосферы являются координаты $(a, \chi, \theta, \phi)$, связанные с декартовыми посредством соотношений

$$\begin{aligned} x_1 &= a \operatorname{sh}\chi \sin\theta \cos\phi, \\ x_2 &= a \operatorname{sh}\chi \sin\theta \sin\phi, \\ x_3 &= a \operatorname{sh}\chi \cos\theta, \\ x_4 &= -ia \operatorname{ch}\chi. \end{aligned} \qquad (11.14)$$

При этом допустимые интервалы изменения псевдосферических координат следующие:

$$0 \le a < \infty,\ 0 \le \chi \le \infty,\ 0 \le \theta \le \pi,\ 0 \le \phi \le 2\pi . \qquad (11.15)$$

Пространство псевдосферической Вселенной является неевклидовым. Если $(\chi, \theta, \phi)$ и $(\chi + d\chi, \theta + d\theta, \phi + d\phi)$ – координаты двух бесконечно близких точек в сопутствующей системе координат, то квадрат пространственного расстояния между ними

$$dl^2 = a^2 \left\{ d\chi^2 + \operatorname{sh}^2\chi \left[ \sin^2\theta (d\phi)^2 + (d\theta)^2 \right] \right\} . \qquad (11.16)$$

Интервал между двумя бесконечно близкими событиями в сопутствующей системе координат, с учётом (11.4), (11.16), запишется в виде

$$ds^2 = c^2 dt - a^2(t) \left\{ d\chi^2 + \operatorname{sh}^2\chi \left[ \sin^2\theta (d\phi)^2 + (d\theta)^2 \right] \right\} . \qquad (11.17)$$

Радиус окружности на псевдосфере $R = a\chi$. Длина окружности радиуса $R$ равна $L = 2\pi a \operatorname{sh}\chi$. Отношение длины окружности к её радиусу $L/R = 2\pi\ (\operatorname{sh}\chi)/\chi$ больше, чем $2\pi$. Площадь двумерной поверхности сферы радиуса $R = a\chi$ равна

$$S(R) = 4\pi a^2 \operatorname{sh}^2(R/a). \tag{11.18}$$

Объём пространства, охватываемый псевдосферой радиуса $R = a\chi$,

$$V(R) = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} \sin\theta d\theta \int_0^{\chi} a^3 \operatorname{sh}^2 \chi d\chi = \pi a^3 \left(\operatorname{sh}^2 2\chi - 2\chi\right). \tag{11.19}$$

С ростом радиуса $R = a\chi$ как $S(R)$, так и $V(R)$ неограниченно растут.

## 11.4. Плоское (евклидово) пространство

Предельным является случай, когда радиус кривизны трёхмерного пространства равен бесконечности. В этом случае трёхмерное пространство Вселенной является плоским (евклидовым). Интервал $ds^2$ для этого случая можно написать в виде

$$ds^2 = c^2dt - b^2(t)(dx^2 + dy^2 + dz^2). \tag{11.20}$$

В качестве пространственных координат удобно использовать декартовы координаты $x$, $y$, $z$. Зависящий от времени множитель $b^2(t)$ в формуле, определяющей квадрат элемента длины

$$dl^2 = b^2(t)(dx^2 + dy^2 + dz^2), \tag{11.21}$$

в плоской Вселенной не меняет евклидовость пространственной метрики. При любом заданном $t$ множитель $b^2(t)$ имеет определённое значение и простым преобразованием координат может быть приведён к единице.

В процессе эволюции плоской Вселенной «вмороженная» в неё декартова система координат претерпевает однородную деформацию. Длина окружности радиуса $a$ в этом пространстве равна $2\pi a$. Площадь сферы $4\pi a^2$. Объём, охватываемый сферой радиуса $a$,

$$V = \frac{4}{3}\pi a^3. \tag{11.22}$$

Плоское пространство формально можно описывать как псевдосферическое [27; 46], записывая $ds^2$ в виде

$$ds^2 = c^2dt^2 - a^2(t)\left\{d\chi^2 + \chi^2\left[\sin^2\theta(d\phi)^2 + (d\theta)^2\right]\right\}. \tag{11.23}$$

# ГЛАВА 12

# КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЯ ФРИДМАНА

Метрика однородного изотропного пространства содержит лишь один скалярный параметр – радиус кривизны. Он определяет кривизну пространства. Уравнения Эйнштейна для однородной изотропной Вселенной могут быть преобразованы в космологические уравнения Фридмана, определяющие зависимость от времени радиуса кривизны и величин, описывающих термодинамические свойства космической среды [19; 27]. Впервые эти уравнения были получены и использованы для описания Вселенной А. А. Фридманом [67]. Эти уравнения лежат в основе космологических моделей однородной изотропной Вселенной.

При получении уравнений Фридмана используется сопутствующая система координат, относительно которой среда покоится, и поэтому компоненты четырёхмерной скорости космической среды $u^i = (1, 0, 0, 0)$. Среда предполагается идеальной, тензор энергии-импульса определяется выражением (10.10). Используя эту формулу для вычисления тензора энергии-импульса, мы тем самым пренебрегаем всеми процессами диссипации, приводящими к возрастанию энтропии. О законности такого пренебрежения см. [46]. В сопутствующей системе координат отличными от нуля оказываются лишь следующие компоненты $T_i^k$:

$$T_0^0 = \varepsilon, T_1^1 = T_2^2 = T_3^3 = -P\,. \tag{12.1}$$

Для описания геометрии однородной изотропной трёхмерной гиперповерхности в уравнениях Фридмана используется трёхмерная криволинейная сопутствующая система координат.

Приведём краткий вывод космологических уравнений Фридмана из уравнений Эйнштейна для случая замкнутого однородного изотропного сферического пространства. Для этого пространства интервал между двумя бесконечно близкими событиями в сопутствующей системе координат преобразуется к виду (11.11). Вместо переменной $t$ воспользуемся переменной $\eta$, определяемой соотношением

$$cdt = ad\eta, \tag{12.2}$$

где $\eta$ – безразмерная величина времени. В этом случае интервал $ds^2$, определяемый формулой (11.11), запишется в виде

$$ds^2 = a^2(\eta)\left\{(d\eta)^2 - (d\chi)^2 - \sin^2\chi\left[(d\theta)^2 + \sin^2\theta(d\phi)^2\right]\right\}. \tag{12.3}$$

Полагая $x^0 = \eta$, $x^1 = \chi$, $x^2 = \theta$, $x^3 = \phi$ и записывая $ds^2$ в стандартном виде (10.1), находим компоненты метрического тензора $g_{ik}$:

$$g_{00} = a^2,\ g_{11} = -a^2,\ g_{22} = -a^2 \sin^2 \chi,$$
$$g_{0\alpha} = 0,\ g_{\alpha\beta} = 0,\ g_{33} = -a^2 \sin^2 \chi \sin^2 \theta. \tag{12.4}$$

Определитель $g = \det(g_{ik})$ равен

$$g = -a^8 \sin^4 \chi \sin^2 \theta. \tag{12.5}$$

Компоненты контравариантного метрического тензора $g^{ik}$ по определению равны

$$g^{ik} = G_{(ik)}/g, \tag{12.6}$$

где $G_{(ik)}$ – миноры, соответствующие элементам $g^{ik}$ в определителе $\det(g_{ik})$. Из теории определителей следует:

$$g_{ik} g^{km} = \delta_i^m. \tag{12.7}$$

Учитывая (12.5)–(12.7), находим

$$g^{00} = a^{-2},\ g^{11} = -a^{-2},$$
$$g^{22} = -a^{-2} \sin^{-2} \chi,\ g^{33} = -a^{-2} \sin^{-2} \chi \sin^{-2} \theta, \tag{12.8}$$
$$g^{0\alpha} = 0,\ g^{\alpha\beta} = 0,\ \alpha, \beta = 1, 2, 3.$$

Вычисляя компоненты тензора Риччи (10.4), получаем

$$R_0^0 = \frac{3}{a^4}\left[(a')^2 - aa''\right],$$
$$R_0^\alpha = 0,\ R_\alpha^\beta = -\frac{1}{a^4}\left[2a^2 + (a')^2 - aa''\right]\delta_\alpha^\beta. \tag{12.9}$$

Штрих означает производную по переменной $\eta$.
Учитывая (12.9), находим след тензора Риччи

$$R = R_0^0 + R_\alpha^\alpha = -\frac{6}{a^3}(a + a''). \tag{12.10}$$

Из (12.9), (12.10) следует

$$R_0^0 - \frac{1}{2}R = 3\left[\left(\frac{a'}{a^2}\right)^2 + \frac{1}{a^2}\right], \tag{12.11}$$

$$R_1^1 - \frac{1}{2}R = R_2^2 - \frac{1}{2}R = R_3^3 - \frac{1}{2}R = 2\frac{a''}{a^3} - \left(\frac{a'}{a^2}\right)^2 + \frac{1}{a^2}. \qquad (12.12)$$

Учитывая (12.1), (12.9)–(12.12), заключаем, что для пространства с метрикой (12.3), однородно заполненного идеальной средой, уравнения Эйнштейна сводятся к двум уравнениям:

$$3\left[\left(\frac{a'}{a^2}\right)^2 + \frac{1}{a^2}\right] = \frac{8\pi G}{c^4}\varepsilon, \qquad (12.13)$$

$$2\frac{a''}{a^3} - \left(\frac{a'}{a^2}\right)^2 + \frac{1}{a^2} = -\frac{8\pi G}{c^4}P. \qquad (12.14)$$

Переходя от переменной $\eta$ к переменной $t$, из (12.2) получаем:

$$a' = \frac{a}{c}\dot{a},\ a'' = \frac{a}{c^2}\left(a\ddot{a} + \dot{a}^2\right). \qquad (12.15)$$

Используя (12.15), уравнения (12.13), (12.14) приводим к виду

$$3\left[\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \left(\frac{c}{a}\right)^2\right] = \frac{8\pi G}{c^2}\varepsilon, \qquad (12.16)$$

$$2\frac{\ddot{a}}{a} + \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \left(\frac{c}{a}\right)^2 = -\frac{8\pi G}{c^2}P. \qquad (12.17)$$

Здесь точка означает производную по времени $t$.

Аналогичные вычисления могут быть проведены для случаев $k = 0$ и $k = -1$. Общим результатом для случаев $k = 0, +1$ являются уравнения

$$3\left[\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{kc^2}{a^2}\right] = -\frac{8\pi G}{c^2}\varepsilon, \qquad (12.18)$$

$$2\frac{\ddot{a}}{a} + \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{kc^2}{a^2} = -\frac{8\pi G}{c^2}P. \qquad (12.19)$$

Эти уравнения носят название космологических уравнений Фридмана. Легко показать, что при любом значении параметра $k$ они могут быть преобразованы к виду

$$\frac{d\varepsilon}{da} + 3\left(\varepsilon + P\right)\frac{1}{a} = 0, \qquad (12.20)$$

$$\ddot{a} = -\frac{4}{3}\pi G\frac{a}{c^2}\left(\varepsilon + 3P\right). \qquad (12.21)$$

Из формулы (12.21) видно, что вклад давления (тепловой энергии) в созда-

ние космологического ускорения может быть существенным. Это имеет место в случае, когда давление соизмеримо с плотностью энергии космической среды. Для обычных космических сред $P > 0$, и, согласно формуле (12.21), эффект влияния давления заключается не в ускорении, а в замедлении скорости расширения Вселенной.

Точка зрения, что давление обычных сред замедляет расширение Вселенной, является общепринятой [27]. Предположение о возможности влияния давления (тепловой энергии) в направлении увеличения скорости разлёта однородной космической среды воспринимается отрицательно. Считается, что поскольку в однородной среде нет градиентов давления, то, следовательно, нет и расталкивающих сил давления. Согласно современным представлениям тепловая энергия обычной однородной изотропной среды может лишь усилить гравитацию. Отметим, что этот вывод получен из стандартных уравнений Фридмана, не учитывающих влияние на космическую среду центробежных космологических сил отталкивания.

В работе [40] показано, что в однородной изотропной Вселенной существенную роль могут играть центробежные космологические силы отталкивания. Они связаны с изменением тепловой энергии космической среды в искривлённом пространстве. Их влияние может приводить к увеличению скорости разлёта космической среды. Согласно этой идее Вселенная является трёхмерной однородной материальной гиперповерхностью, погружённой в четырёхмерное пространство. Гипотеза о существовании четвёртого крупномасштабного пространственного измерения имеет важное следствие. В четырёхмерной сферической (псевдосферической) системе координат, вследствие наличия у космической среды тепловой энергии, в радиальном направлении действуют центробежные силы. Они растягивают трёхмерную гиперповерхность и в сопутствующей системе координат проявляются как силы отталкивания. Они являются центробежными по своей природе, хотя и не связаны с вращением Вселенной как целого. Этот теоретически возможный вариант космологических сил отталкивания в настоящей книге не рассматривается.

В современной космологии гипотетически считается, что наряду с обычными средами, для которых $\varepsilon > 0$ и $P > 0$, существуют и необычные среды, имеющие отрицательное давление. Их наличие, в случае если $(\varepsilon + 3P) < 0$, как видно из (12.21), оказывает расталкивающее действие на однородную космическую среду. Это свойство сред с отрицательным давлением используется для объяснения наблюдаемой динамики Вселенной [19; 77; 97; 100; 101].

Современная космологическая модель Вселенной, основанная на уравнениях Фридмана (12.18), (12.19), описана в гл. 14.

В настоящей книге рассматривается вариант уравнений Фридмана, кардинально отличающийся от используемого в современной космологии. Считается, что гравитация различает частицы и античастицы, как реальные, так

и виртуальные, Вселенная симметрична по ним и является не только электро-, но и гравитационно-нейтральной.

Считается, что главной компонентой космической среды является вакуум. Частицы и античастицы являются его возмущёнными состояниями. Частицы – состояниями с положительной энергией, а античастицы – с отрицательной энергией.

В двузнаковой гравитации источником гравитационного поля является тензор энергии-импульса. Его отличие от тензора энергии-импульса ОТО заключается лишь в одном: однотипные вклады в этот тензор частиц и античастиц, реальных и виртуальных, не суммируются, а вычитаются. При записи этого тензора учитывается следующее.

Квантовая теория различает частицы и античастицы и поэтому естественно это учесть и в теории гравитации.

Следуя Фейнману [86], античастицы рассматриваем как частицы, но с отрицательной энергией и движущиеся во времени вспять.

Считаем, что гравитационные заряды частиц и античастиц определяются их энергиями, а они в двузнаковой гравитации имеют разные знаки. Время для частиц и античастиц течёт в противоположном направлении.

Вклады частиц и античастиц в тензор энергии-импульса вследствие различия у них знаков энергии и симметрии Вселенной по ним сокращаются, и космологические уравнения Фридмана в двузнаковой гравитации приобретают предельно простой вид:

$$\dot{a}^2 = c^2, \quad \ddot{a} = 0. \tag{12.22}$$

Модель гравитационно-нейтральной Вселенной, основанная на этих уравнениях, рассмотрена в гл. 17.

# ГЛАВА 13

# УРАВНЕНИЯ ЭЙНШТЕЙНА С Λ-ЧЛЕНОМ

Уравнения Эйнштейна (10.3) не содержат сил отталкивания. Вариант уравнений общей теории относительности, содержащий силы отталкивания, был предложен Эйнштейном в работе [73]. Он связан с введением в уравнения гравитационного поля дополнительного слагаемого – Λ-члена. С учётом Λ-члена уравнения Эйнштейна имеют вид

$$R_i^k - \frac{1}{2}\delta_i^k R = \frac{8\pi G}{c^4} T_i^k + \delta_i^k \Lambda\,, \tag{13.1}$$

где Λ – так называемая космологическая постоянная. Значение этой универсальной постоянной находят из сравнения предсказаний теории и наблюдений. Считается, что $\Lambda \approx 10^{-56}$ см [19; 27].

Учёт эйнштейновских сил отталкивания, описываемых Λ-членом в уравнениях Эйнштейна, приводит к появлению в правых частях уравнений Фридмана (12.18) и (12.19) дополнительных слагаемых. Они принимают вид [27]

$$3\left[\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{kc^2}{a^2}\right] = \frac{8\pi G}{c^2}\varepsilon + c^2\Lambda\,, \tag{13.2}$$

$$2\frac{\ddot{a}}{a} + \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{kc^2}{a^2} = -\frac{8\pi G}{c^2}P + c^2\Lambda\,. \tag{13.3}$$

Переход от (10.3) к (13.1) часто связывают с неформальной заменой [27]

$$\begin{gathered} T_i^k \Rightarrow T_{i\,eff}^k = (\varepsilon_{eff} + P_{eff})u_i u^k - P_{eff}\delta_i^k, \\ \varepsilon = \varepsilon_{eff} = \varepsilon + \varepsilon_\Lambda,\ P \Rightarrow P_{eff} = P + P_\Lambda, \end{gathered} \tag{13.4}$$

где

$$\varepsilon_\Lambda = \frac{c^4\Lambda}{8\pi G}, \quad P_\Lambda = -\varepsilon_\Lambda\,. \tag{13.5}$$

Широко распространена точка зрения, что ε и $P$ определяют плотность энергии и давление обычной материи, а $\varepsilon_\Lambda$ и $P_\Lambda$ – эти же величины, но для гипотетической компоненты космической среды, называемой тёмной энергией. Параметры тёмной энергии, как видно из (13.5), определяются значениями космологической постоянной Λ, гравитационной постоянной $G$ и скорости света $c$.

Уравнение состояния тёмной энергии имеет вид

$$P_\Lambda = -\varepsilon_\Lambda\,. \tag{13.6}$$

Тёмная энергия является уникальной средой. В гл. 20 показано, что только для этой среды её параметры во всех локально-инерциальных системах отсчёта остаются постоянными и одинаковыми.

Из уравнений (13.2), (13.3) легко получить формулу, определяющую космологическое ускорение, создаваемое тёмной энергией, см. (12.21). Она имеет вид [27]

$$\ddot{a}_\Lambda = -\frac{4}{3}\pi G \frac{a}{c^2} \; \varepsilon_\Lambda + 3P_\Lambda \; = \frac{1}{3}\Lambda c^2 a \,. \tag{13.7}$$

Для эйнштейновских сил отталкивания, источниками которых являются величины $\varepsilon_\Lambda$ и $P_\Lambda$, важно, что $P_\Lambda = -\varepsilon_\Lambda$, вследствие чего при $\Lambda > 0$, как видно из (13.7), и возникают силы отталкивания. Следует также обратить внимание на то, что поле эйнштейновских сил отталкивания может существовать, даже если формально считать, что $G \equiv 0$. Вследствие этого оно является независимым от гравитационного поля, создаваемого обычной материей.

**Замечание.** Учитывая в уравнениях Эйнштейна Λ-член, тензор энергии-импульса для гравитационного поля, определяемый формулой (10.8), следует записывать в виде

$$G_\mu^\nu = -\frac{c^4}{8\pi G} B_\mu^\nu + \varepsilon_\Lambda \delta_\mu^\nu \,. \tag{13.8}$$

Космологические уравнения Фридмана (13.2), (13.3) лежат в основе современной стандартной космологической модели Вселенной (ΛCDM-модели).

Введение Эйнштейном Λ-члена в уравнения ОТО в работе [73] было связано с его представлениями о Вселенной. Эйнштейн был убеждён, что Вселенная является не только однородной и изотропной, но и стационарной. Для объяснения стационарности Вселенной ему пришлось предположить, что наряду с силами всемирного тяготения в природе существуют также и силы всемирного отталкивания. Он считал, что во Вселенной это силы уравновешивают друг друга и, вследствие этого, она является стационарной. Связать космологические силы отталкивания с известными свойствами материи Эйнштейн не пытался. Он считал, что эти силы связаны с неустранимой кривизной пространства-времени, которая и является их источником. В современной космологии неустранимая кривизна четырёхмерного пространства-времени рассматривается как некоторый вид материи.

Когда из анализа результатов наблюдений (Хаббл, 1929 г.) стало очевидно, что Вселенная нестационарна, Эйнштейн утратил интерес к проблеме космологических сил отталкивания. Зачем вводить Λ-член, если нестационарность Вселенной можно понять и без него?

Ситуация кардинально изменилась в последние десятилетия. Ещё сравнительно недавно считалось, что динамику Вселенной определяют силы

тяготения [19; 27; 46]. В настоящее время считается, что её, не в меньшей степени, определяют также и силы отталкивания. Первым чётким указанием на это были наблюдательные данные о зависимости между видимой звёздной величиной и красным смещением для сверхновых типа *Ia* [97; 100].

В современной космологии утвердилось мнение: правильное описание наблюдаемой динамики Вселенной может быть дано лишь в рамках ОТО с Λ-членом [19; 70]. Согласия этой теории и наблюдений удаётся достичь, считая, что современная Вселенная более чем на 70 % состоит из тёмной энергии и при этом её расширение происходит с ускорением.

В современной теории гравитации тёмную энергию рассматривают как вакуумную форму материи [19; 27]. В ОТО, при попытке рассматривать тёмную энергию как физический вакуум, возникает проблема космологической постоянной. Она заключается в следующем. Согласно общей теории относительности любая форма материи, в том числе и вакуумная, является источником гравитационного поля. Если, следуя основополагающей идее ОТО о неразличимости частиц и античастиц в гравитации, вычислить плотность энергии физического вакуума, то она оказывается в огромное количество раз больше, чем значение плотности тёмной энергии, найденной из сравнения теории и наблюдений [26; 28]. В современной космологии физический вакуум не учитывают и считают, что тёмная энергия – это нечто другое.

Согласно двузнаковой гравитации трудность объяснения в рамках ОТО природы вакуумных форм материи, в том числе тёмной энергии, заключается в ошибочности идеи о неразличимости частиц и античастиц в гравитации. В настоящей книге показано, что общая теория относительности является ограниченной теорией, поскольку она неправильно описывает гравитационное взаимодействие частиц и античастиц, а также гравитационные свойства вакуума.

В следующей главе приведено описание космологической модели Вселенной, основанной на уравнениях Эйнштейна для гравитационного поля с Λ-членом.

# ГЛАВА 14

# СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ ВСЕЛЕННОЙ (ΛCDM-МОДЕЛЬ)

## 14.1. Исходные предположения

Приведём описание современной космологической модели Вселенной, называемой стандартной или ΛCDM-моделью. В её основе лежат следующие предположения.

- Вселенная однородна и изотропна.
- Динамика Вселенной определяется влиянием гравитационного поля. Оно описывается уравнениями Эйнштейна с Λ-членом.
- Космическая среда состоит из трёх компонент: нерелятивистской, релятивистской и тёмной энергии. Обычно параметры этих компонент обозначают соответственно значками $M$, $rad$ и $\Lambda$ [19]. Считается, что уравнения состояния этих компонент имеют вид

$$P_M = 0,\ P_{rad} = \frac{1}{3}\varepsilon_{rad},\ P_\Lambda = -\varepsilon_\Lambda\,. \tag{14.1}$$

Значками $P$, $\rho$, $\varepsilon$ здесь и далее обозначаются давление, плотности массы и энергии соответственно. Нерелятивистская компонента содержит в себе барионную компоненту и тёмную материю.

Современные плотности компонент космической среды в ΛCDM-модели определяются безразмерными параметрами:

$$\Omega_M = \frac{\rho_{M,0}}{\rho_c},\quad \Omega_{rad} = \frac{\rho_{rad,0}}{\rho_c},\quad \Omega_\Lambda = \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c}, \tag{14.2}$$

где $\rho_{M,0}$ и $\rho_{rad,0}$ – современные плотности нерелятивистской и релятивистской компонент соответственно. Величина

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \tag{14.3}$$

называется критической плотностью. $H_0 = h \cdot 100$ км/(с · Мпк) – постоянная Хаббла, $G$ – гравитационная постоянная. Плотность тёмной энергии $\varepsilon_\Lambda$ и её давление $P_\Lambda$ определяются формулами (13.5) и в процессе расширения Вселенной остаются постоянными.

- Пространство Вселенной является однородной трёхмерной гиперповерхностью. В сопутствующей системе координат метрика четырёхмерного пространства-времени определяется формулой

$$ds^2 = c^2dt - a^2(t)\left[d\chi^2 + f(\chi)(d\theta^2 + \sin^2(\theta)d\varphi^2)\right], \tag{14.4}$$

$$f(\chi)=\left(\sin^2\chi, k=+1\right);\left(\mathrm{sh}^2\chi, k=-1\right);\left(\chi^2, k=0\right). \qquad (14.5)$$

При $k = +1$ Вселенная замкнутая, её трёхмерное пространство сферическое и имеет конечный объём. Если $k = -1$, то Вселенная является открытой, её трёхмерное пространство псевдосферическое. При $k = 0$ Вселенная плоская и безграничная. Изменение масштаба Вселенной описывается скалярной функцией $a(t)$.

## 14.2. Уравнения стандартной модели

В основе ΛCDM-модели лежат уравнения Эйнштейна с Λ-членом:

$$R_i^k-\frac{1}{2}\delta_i^k R=\frac{8\pi G}{c^4}\left(T_{i,M}^k+T_{i,rad}^k\right)+\Lambda\delta_i^k, \qquad (14.6)$$

где Λ – космологическая постоянная.

С учётом сделанных в п. 14.1 предположений уравнения (14.6) могут быть стандартным образом преобразованы в космологические уравнения Фридмана [19, гл.4]:

$$\left(\frac{1}{\overline{a}}\cdot\frac{d\overline{a}}{d\tau}\right)^2=-k\frac{\Omega_{curv}}{\overline{a}^2}+\frac{\Omega_M}{\overline{a}^3}+\frac{\Omega_{rad}}{\overline{a}^4}+\Omega_\Lambda, \qquad (14.7)$$

$$\frac{d^2\overline{a}}{d\tau^2}=-\frac{\Omega_M}{2\overline{a}^2}-\frac{\Omega_{rad}}{\overline{a}^3}+\Omega_\Lambda\overline{a}, \qquad (14.8)$$

где $\overline{a}=a/a_0$, $\tau=t\cdot H_0$, $a_0$ – масштаб современной Вселенной, $H_0^{-1}$ – удобная в космологии единица измерения времени. Значок «0» здесь и далее относится к величинам, определяющим состояние современной Вселенной.

В ΛCDM-модели параметр

$$\Omega_{curv}=\frac{c^2}{a_0^2H_0^2} \qquad (14.9)$$

определяет отношение квадратов длин $cH_0^{-1}$ и $a_0$. В гл. 17 показано, что параметр $\Omega_{curv}$ определяет безразмерную современную плотность гравитационно-нейтрального вакуума в единицах $\rho_c$.

В ΛCDM-модели величина $H_0^{-1}$ определяет по порядку величины возраст современной Вселенной [19; 27].

Уравнения (14.7), (14.8) решаются с граничными условиями

$$\overline{a}(\tau_0)=1,\quad \left(\frac{d\overline{a}}{d\tau}\right)(\tau_0)=1, \qquad (14.10)$$

где $\tau_0$ – возраст современной Вселенной. Считается, что «Большой взрыв» имел место при $\tau = 0$.

## 14.3. Параметры ΛCDM-модели

Как видно из (14.7), (14.8), параметрами, определяющими эволюцию Вселенной в рамках ΛCDM-модели, являются

$$\Omega_M, \Omega_{rad}, \Omega_{curv}, \Omega_\Lambda, h, k. \tag{14.11}$$

Эти параметры не являются независимыми. Из уравнения (14.7), с учётом граничных условий (14.10), следует

$$-k\Omega_{curv} + \Omega_M + \Omega_{rad} + \Omega_\Lambda = 1. \tag{14.12}$$

Практика применения ΛCDM-модели для интерпретации наблюдательных данных определила области допустимых значений каждого из параметров (14.11).

**Параметры $\Omega_{curv}$ и $k$.** Расчёты, в которых предполагается, что $k = +1$ и Вселенная является замкнутой, не позволяют правильно интерпретировать наблюдаемую динамику Вселенной. Необходимо считать, что пространственная кривизна Вселенной или точно равна нулю, или весьма мала. Считается, что Вселенная с хорошей точностью является пространственно плоской. В ΛCDM-модели это сводится к ограничению на величину $k \cdot \Omega_{curv}$ ($k \cdot \Omega_{curv} < 0{,}02$) [19; 70]. Для интерпретации наблюдений часто используется «плоская» ΛCDM-модель, в которой полагают $k \cdot \Omega_{curv} = 0$.

**Постоянная Хаббла $H_0$, критическая плотность $\rho_c$.** Обработка обширных наблюдательных данных [103] даёт

$$H_0 = 65 \pm 5 \text{ км/(с} \cdot \text{Мпк)}. \tag{14.13}$$

Часто её записывают в виде $H_0 = 100\,h$ км/(с · Мпк). В оценочных расчётах будем полагать $h = 0{,}65$. Величина критической плотности

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} = 1{,}88 \cdot 10^{-29} h^2 \text{ г/см}^3. \tag{14.14}$$

**Параметр $\Omega_{rad}$.** Считают, что современная плотность релятивистской компоненты космической среды $\rho_{rad,0}$ содержит вклады двух составляющих – реликтового излучения $\rho_{\gamma,0}$ и трёх поколений нейтрино $\rho_{\nu,0}$ [19]:

$$\rho_{rad,0} = \rho_{\gamma,0} + \rho_{\nu,0}. \tag{14.15}$$

Учитывают, что реликтовое излучение в настоящее время имеет температуру $T_0 = 2{,}725$ K [19]. В соответствии с законом Стефана – Больцмана

$$\rho_{\gamma,0} = 2\frac{\pi^2 k_B^4 T_0^4}{30\hbar^3 c^5}, \tag{14.16}$$

где $k_B$ – постоянная Больцмана, фактор 2 связан с наличием двух поляризаций фотонов.

Вклад трёх типов нейтрино в современную плотность релятивистской компоненты оценивается как 0,68 от плотности $\rho_{\gamma,0}$ [Там же].

Учитывая, что $\rho_{rad,0} = 1{,}68\rho_{\gamma,0}$, а также формулы (14.14), (14.16) и полагая $T_0 = 2{,}725$ K, находят

$$\Omega_\gamma = \rho_{\gamma,0}/\rho_c = 2{,}5\cdot 10^{-5}/h^2,\ \Omega_{rad} = 1{,}68\Omega_\gamma, \tag{14.17}$$

$$\Omega_{rad} = 4{,}2\cdot 10^{-5}/h^2. \tag{14.18}$$

Это значение параметра $\Omega_{rad}$ обычно и предполагается в ΛCDM-модели.

**Параметр $\Omega_M$ и $\Omega_\Lambda$.** Хорошее согласие ΛCDM-модели с наблюдениями [77; 90; 101; 104] имеет место при значениях параметров

$$\Omega_M = 0{,}27 \pm 0{,}03,\ \Omega_\Lambda = 0{,}73 \pm 0{,}03. \tag{14.19}$$

Эти значения являются не результатом непосредственных измерений, а следствием подгонки параметров ΛCDM-модели с целью наилучшего объяснения наблюдательных данных. Могут ли реальные значения параметров $\Omega_M$ и $\Omega_\Lambda$ значительно отличаться от предполагаемых в (14.19)? В настоящей книге такая возможность не исключается.

Знание значений параметров (14.11), считающихся наиболее вероятными, упрощает практику применения ΛCDM-модели для интерпретации наблюдений.

## 14.4. Качественный анализ эволюции Вселенной

Уравнение (14.8), определяющее изменение характерного масштаба Вселенной $\bar{a}(\tau)$ в ΛCDM-модели, запишем в виде

$$\frac{d^2\bar{a}}{d\tau^2} = -\frac{dU_\Lambda(\bar{a})}{d^2\bar{a}}, \tag{14.20}$$

где

$$U_\Lambda(\bar{a}) = -\frac{\Omega_M}{2\bar{a}} - \frac{\Omega_{rad}}{2\bar{a}^2} - \frac{\Omega_\Lambda \bar{a}^2}{2}. \tag{14.21}$$

Уравнение (14.20) аналогично уравнению, описывающему одномерное движение частицы в потенциальном поле [45]. По виду функции $U_\Lambda(\bar{a})$, используя стандартную процедуру, можно определить возможные типы решений уравнения (14.20), не решая его аналитически или численно, и качественно изобразить вид функций $\bar{a}(\tau)$, описывающих решения этого уравнения. Ограничимся рассмотрением лишь тех из них, которые, как полагают, правильно описывают наблюдаемую динамику Вселенной.

Интегрируя (14.20), находим его первый интеграл – «энергию»:

$$E_\Lambda = \frac{1}{2}\left(\frac{d\bar{a}^2}{d\tau}\right) + U_\Lambda(\bar{a}) = \text{const}, \tag{14.22}$$

Учитывая начальные условия (14.10), а также соотношение (14.12), находим константу интегрирования:

$$E_\Lambda = -\frac{1}{2}k\Omega_{curv}. \tag{14.23}$$

Используя приближение «плоской» ΛCDM-модели ($k = 0$), константу интегрирования $E_\Lambda$ полагают равной нулю.

На рис. 14.1 изображены графики зависимости $U_\Lambda(\bar{a})$ для значений $\Omega_{rad} = 4{,}2 \cdot 10^{-5}/h^2$, $\Omega_\Lambda = 1 - \Omega_M - \Omega_{rad}$ и $\Omega_M$ в интервале от 0,2 до 0,3 с шагом 0,05. Выбор такого интервала для $\Omega_M$ связан с учётом данных о вероятных значениях этого параметра, основанных на практике применения ΛCDM-модели для интерпретации различных наблюдений. Значительные изменения (например, на порядок) параметра $\Omega_{rad}$ мало влияют на вид $U_\Lambda(\bar{a})$ и соответствующие решения $\bar{a}_\Lambda(\tau)$ в широкой области их изменения. Влияние этого параметра на решения имеет место лишь в области значений $\bar{a} \lessgtr \bar{a}_{eq} = \Omega_{rad}/\Omega_M$.

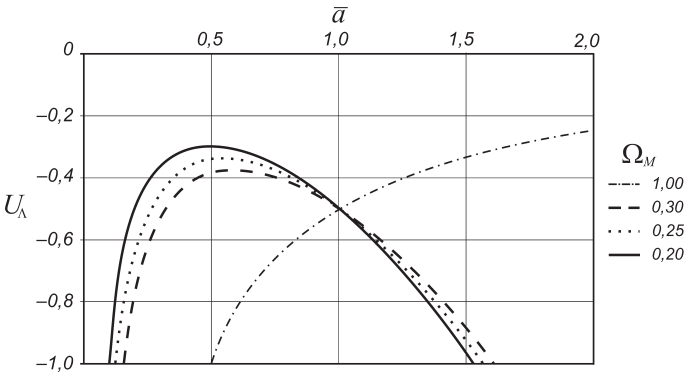



*Рис. 14.1. Графики зависимости $U_\Lambda(\bar{a})$ для некоторых вероятных значений параметров ΛCDM-модели ($\Omega_{rad} = 0$; $\Omega_\Lambda = 1 - \Omega_M - \Omega_{curv}$). График, соответствующий значению $\Omega_M = 1$, проведён для сравнения*

На рис. 14.2 изображены графики зависимостей $\bar{a}_\Lambda(\tau)$, найденные численным решением уравнения (14.8) с граничным условием (14.10). Приведены решения для тех же значений параметров модели, что и на рис. 14.1.

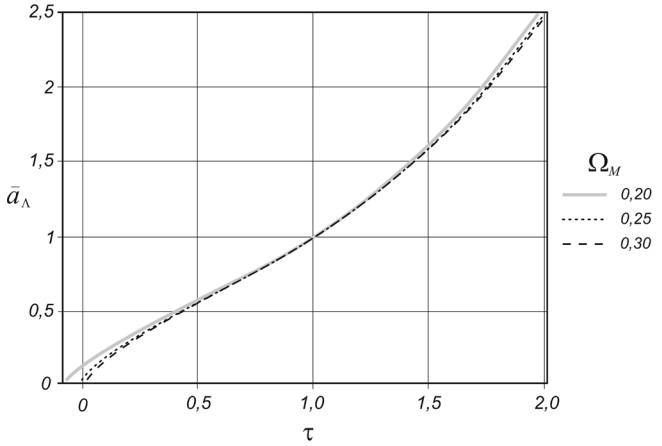



*Рис. 14.2. Графики зависимости* $\bar{a}_\Lambda(\tau)$ *в ΛCDM-модели. Приведены графики для следующих значений параметров:* $k \cdot \Omega_{curv} = 0$; $\Omega_M$ *от 0,2 до 0,3 с шагом 0,05;* $\Omega_\Lambda = 1 - \Omega_M(1 + \bar{a}_{eq})$, $\bar{a}_{eq} = \Omega_{rad}/\Omega_M$; $\tau = t/t_0$, $H_0 = 65$ *км/(с·Мпк)*, $t_0 = H_0^{-1}$

Многочисленные применения ΛCDM-модели для интерпретации различных наблюдательных данных показывают, что, по-видимому, наиболее вероятными значениями параметров $\Omega_M$ и $\Omega_\Lambda$ являются: $\Omega_M \approx 0{,}27$, $\Omega_\Lambda \approx 0{,}73$, см [77; 90; 104]. При этих значениях параметров $\Omega_M$ и $\Omega_\Lambda$, как видно из рис. 14.2, согласно ΛCDM-модели, возраст Вселенной оказывается приблизительно равным $1{,}4 \cdot 10^{10}$ лет. При этом первую половину этого времени Вселенная расширялась с замедлением, а последние приблизительно 7 млрд лет она расширяется с ускорением. С учётом приведённых выше значений параметров из (14.8) следует, что в настоящее время космологические силы отталкивания значительно (приблизительно в шесть раз) превосходят силы притяжения.

## 14.5. Эпохи эволюции Вселенной в ΛCDM-модели

В ΛCDM-модели динамику Вселенной определяет влияние трёх компонент космической среды: релятивистской, нерелятивистской и тёмной энергии. В зависимости от того, влияние какой из них является главным, выделяют три эпохи её эволюции. Считается, что такое деление времени эволюции Вселенной на эпохи является возможным начиная с времён, когда завершились процессы рождения/уничтожения электрон-позитронных пар и установилось определённое соотношение между количеством барионов и фотонов. Эти времена, согласно расчётам в рамках ΛCDM-модели, наступили приблизительно через десять секунд после Большого взрыва. В космической среде произошло выделение релятивистской и нерелятивистской компонент. Динамику Вселенной стало возможным описывать, используя уравнения (14.7), (14.8) [11; 19; 27].

В эпоху доминирования радиации (*RD*-эпоху) главное влияние на динамику Вселенной имела релятивистская компонента космической среды.

Влияние нерелятивистской компоненты было главным в эпоху, которую часто называют пылевидной. В ΛCDM-модели её естественно определять как *CDM*-эпоха (C – Cold, D – Dark, M – Matter).

В эпоху доминирования тёмной энергии главное влияние имеют космологические силы отталкивания. Они в ΛCDM-модели описываются Λ-членом уравнений Эйнштейна. С учётом этого данную эпоху обозначаем как Λ-эпоху.

***RD*-эпоха.** Согласно (14.8) уравнение, качественно описывающее изменение масштаба Вселенной в *RD*-эпоху, может быть записано в виде

$$\frac{d^2 a}{dt^2} = -\frac{\tau_{rad}}{a^3}, \tag{14.24}$$

где $\tau_{rad}$ – постоянная величина. Оно имеет решение

$$a(t) = \text{const} \cdot t^{1/2}. \tag{14.25}$$

В эту эпоху основной вклад в плотность энергии и давление космической среды связан с релятивистской компонентой. Справедливы соотношения

$$\varepsilon \sim P \sim T^4 \sim a^{-4}. \tag{14.26}$$

В процессе расширения Вселенной плотность энергии релятивистской компоненты ($\varepsilon_{rad} \sim a^{-4}$). Как показывают расчёты в рамках ΛCDM-модели, *RD*-эпоха закончилась приблизительно через 80 тыс. лет после Большого взрыва [19; 27], затем началась C*DM*-эпоха.

***CDM*-эпоха.** Учитывая (14.8), уравнение, качественно описывающее изменение масштаба Вселенной в *CDM*-эпоху, записываем в виде

$$\frac{d^2 a}{dt^2} = -\frac{\tau_M}{a^2}, \tag{14.27}$$

где $\tau_M$ – постоянная величина. Оно имеет решение

$$a(t) = \text{const} \cdot t^{2/3}. \tag{14.28}$$

В эту эпоху главный вклад в плотность энергии космической среды связан с её нерелятивистской компонентой. Справедливы соотношения

$$\varepsilon_M \sim \rho_M \sim a^{-3}. \tag{14.29}$$

Согласно расчётам *CDM*-эпоха закончилась приблизительно через 6–7 млрд лет после Большого взрыва и далее наступила Λ-эпоха.

**Λ-эпоха.** Согласно существующим представлениям о значениях параметров ΛCDM-модели приблизительно через 6–7 млрд лет после Большого взрыва

главную роль в правой части уравнения (14.8) стало играть последнее слагаемое. Наступила эпоха тёмной энергии. В эту эпоху Вселенная расширяется ускоренно, и со временем влияние эйнштейновских сил отталкивания лишь возрастает. Согласно расчётам в рамках ΛCDM-модели в современной Вселенной космологические силы отталкивания в пять-шесть раз больше, чем силы притяжения.

Уравнение, качественно описывающее изменение масштаба Вселенной в Λ-эпоху, имеет вид

$$\frac{d^2 a}{dt^2} = \frac{1}{3} c^2 \Lambda a \,, \tag{14.30}$$

Его решение

$$a(t) = \mathrm{const} \cdot \exp(t/t_\Lambda), \tag{14.31}$$

где

$$t_\Lambda = \left(\frac{1}{3} c^2 \Lambda\right)^{-1/2} \tag{14.32}$$

– характерное время экспоненциального роста масштаба Вселенной в эпоху тёмной энергии. Полагаем, что наличие в ΛCDM-модели особенности в поведении масштаба $a(t)$, при $t \to \infty$, является её существенным недостатком. Об этом подробно в следующей главе.

# ГЛАВА 15

# ПРОБЛЕМЫ ΛCDM-МОДЕЛИ

Выскажем замечания в адрес ΛCDM-модели. Эта модель содержит пять независимых параметров, см. (14.11), (14.12). Значение четырёх из них – $\Omega_M$, $\Omega_{curv}$, $\Omega_\Lambda$ и $k$ – не определяются непосредственно из наблюдений и являются подгоночными. Модель, содержащую так много свободных параметров, вряд ли можно считать хорошей с точки зрения её эффективности для описания динамики Вселенной.

Важнейшие в ΛCDM-модели компоненты космической среды – тёмная материя и тёмная энергия. Они в прямом эксперименте не наблюдаются и поэтому являются гипотетическими сущностями. Нет понимания их природы. Считается, что в этом состоит не только проблема ΛCDM-модели, но физики в целом [18; 19].

В течение многих десятилетий предпринимались многочисленные, но безуспешные попытки найти источники тёмной материи среди слабосветящихся гравитирующих объектов. Последнее время их пытаются найти среди слабо взаимодействующих массивных, ещё не открытых частиц, но пока также без результата. Возможно, что ищут не то, что надо искать в реальности.

Проблема тёмной энергии кажется ещё более сложной. Её суть заключается в следующем. Совершенно не понятно, почему в гравитации физический вакуум квантовой теории, имеющий, как считается, огромную плотность энергии, не проявляется, а тёмная энергия, являющаяся также вакуумной формой материи и имеющая несравненно меньшую плотность энергии, проявляется? Почему космологическая постоянная имеет столь малое значение и влияние тёмной энергии проявляется лишь на космологических масштабах? Попытки решения этой проблемы предпринимаются уже давно, но не были успешными [26; 28].

Учитывая вышесказанное, многие выводы, полученные в рамках ΛCDM-модели, следует рассматривать лишь как гипотетические. Например, считается, что современная Вселенная расширяется ускоренно [97; 100], и это преподносится как достоверно установленный наблюдательный факт. В реальности вывод об ускоренном расширении Вселенной является лишь следствием применения ΛCDM-модели для объяснения наблюдений и веры в правильность ОТО. Этот вывод вовсе не следует непосредственно из наблюдений (см. гл. 18).

В современной космологии считается, что ΛCDM-модель правильно описывает динамику Вселенной, а отмеченные выше её трудности являются временными и будут устранены в процессе уточнения параметров модели [19].

Полагаем, что, возможно, это не так, поскольку имеются веские основания сомневаться в правильности гипотез, лежащих в основе ΛCDM-модели. Ими, на наш взгляд, являются следующие.

1а. Гравитация не различает частицы и античастицы. Между любыми частицами и античастицами существует тяготение. Современная Вселенная состоит лишь из частиц.

2а. Главное влияние на динамику современной Вселенной оказывает вакуумная форма материи, называемая тёмной энергией.

Эти гипотезы не согласуются с положениями квантовой теории в её простом и красивом варианте. В этой теории различие частиц и античастиц является бесспорным фактом. В то же время в общей теории относительности гравитация их не различает, хотя в прямом эксперименте это и не доказано. В силу сложности экспериментальной проверки гипотезы о неразличии частиц и античастиц в гравитации соответствующие исследования пока находятся лишь в зачаточном состоянии [81].

В квантовой теории основополагающей сущностью мира является физический вакуум. В ΛCDM-модели считается, что тёмная энергия является вакуумной формой материи. Оставаясь в рамках общей теории относительности, установить связь между тёмной энергией и физическим вакуумом не удаётся.

В отсутствие убедительных теоретических и экспериментальных доказательств приведённых выше гипотез в [42; 43; 92] предложена теория гравитации, основанная на альтернативных им гипотезах.

1б. Реальная гравитация различает частицы и античастицы, и между ними существует антитяготение. Вселенная симметрична по частицам и античастицам и является не только электро-, но и гравитационно-нейтральной.

2б. Главной компонентой космической среды является физический вакуум. Он однородно заполняет Вселенную. Частицы и античастицы являются возбуждёнными состояниями вакуума. Частицы – состояниями с положительной энергией, а античастицы – состояниями с отрицательной энергией. Энергия и гравитационный заряд являются тождественными понятиями.

Теория гравитации, различающая частицы и античастицы и предполагающая гравитационную нейтральность Вселенной, названа авторами двузнаковой гравитацией. В этой теории в состав космической среды входит лишь то, что наблюдается в реальных экспериментах.

Космологическая модель Вселенной, основанная на двузнаковой гравитации, является предельно простой. В ней нет проблем ΛCDM-модели. В рамках этой модели значительно проще и убедительнее, чем в ΛCDM-модели, описывается наблюдаемая динамика Вселенной.

# ГЛАВА 16

# УРАВНЕНИЯ ДВУЗНАКОВОЙ ГРАВИТАЦИИ

В этой главе записаны уравнения двузнаковой гравитации, лежащие в основе космологической модели гравитационно-нейтральной Вселенной.

## 16.1. Двузнаковость энергии. Частицы и античастицы

В релятивистской механике формула, определяющая связь энергии $E$ и импульса $P$ для частиц массы $m$, имеет вид

$$E^2 = m^2c^4 + P^2c^2, \tag{16.1}$$

где $c$ – скорость света.

Из этой формулы следует, что энергия частиц, при одном и том же значении импульса $P$, вообще говоря, может быть как положительной ($E_+$), так и отрицательной ($E_-$):

$$E_\pm = \pm\,[m^2c^4 + P^2c^2]^{1/2}. \tag{16.2}$$

В классической физике считается, что в реальности существуют лишь частицы с положительной энергией $E_+$, а частиц с отрицательной энергией $E_-$ нет. Предполагается, что в начальный момент все частицы имели энергию $E \geqslant mc^2$, а вследствие непрерывности в изменении параметров перейти через «запрещённую» область энергий $-mc^2 < E < mc^2$ и попасть в область энергий $E \leqslant -\,mc^2$ они не могут.

В реальности вопрос о возможности существования частиц с энергией $E \leqslant -mc^2$ следует решать в рамках не классической, а квантовой механики.

В релятивистской квантовой механике доказано, что собственные функции не могут образовать полный набор, если в него не включить состояния с отрицательной энергией [21]. Это означает, что необходимо считать, что состояния с отрицательной энергией должны существовать.

Интересную интерпретацию состояний с отрицательной энергией предложил Фейнман [86]. Она заключается в следующем.

Для частицы (состояния с положительной энергией $E_+$), движущейся вдоль оси $x$ и обладающей положительным импульсом $P$, волновая функция имеет вид

$$\Psi_+\left(x, t\right) = e^{(i/\hbar)\left(Px - E_+ t\right)}. \tag{16.3}$$

Фаза волновой функции постоянна, когда

$$Px - E_{+}t = \text{const}, \tag{16.4}$$

а следовательно, когда

$$x = \frac{E_{+}}{P}t\,, \tag{16.5}$$

то есть частица движется в положительном направлении оси.

Для античастицы (состояния с отрицательной энергией $E_{-}$), движущейся вдоль оси $x$ и обладающей положительным импульсом, волновая функция

$$\Psi_{-}\left(x,t\right) = e^{(i/\hbar)\left(Px - E_{-}t\right)}. \tag{16.6}$$

Отсюда вместо (16.5) получаем

$$x = \frac{E_{-}}{P}t = \frac{E_{-}}{\left(-P\right)}\left(-t\right). \tag{16.7}$$

Эту формулу Фейнман интерпретировал следующим образом. Античастицу можно рассматривать как частицу, но с отрицательной энергией и движущуюся назад по времени.

В двузнаковой гравитации, следуя Фейнману, античастицы рассматриваем как частицы, но с отрицательной энергией и движущиеся во времени вспять.

Учёт этой идеи в двузнаковой гравитации позволяет:

1) сохранить положение общей теории относительности о том, что источником гравитационного поля является энергия и при этом учесть различие в гравитации частиц и античастиц;

2) непротиворечивым образом совместить закон сохранения энергии и закон сохранения гравитационного заряда в любых элементарных процессах взаимодействия частиц/античастиц, в том числе и тогда, когда имеет место их рождение/уничтожение.

Идея Фейнмана о том, что античастицы можно рассматривать как частицы, но с отрицательной энергией и движущиеся во времени вспять, является глубокой по содержанию. Она содержит в себе значительный шаг к равноправному описанию частиц и античастиц в релятивистской теории. Очевидно, что последовательное применение этой идеи в термодинамике и кинетике тепловых явлений в веществе и антивеществе существенно повлияет на такие фундаментальные понятия, как энергия, температура, время и другие. Применение этой идеи в теории гравитации приводит в заданном гравитационном поле к изменению направления силы, когда частицу заменяют на античастицу. Учитывая это, заключаем: между частицами и античастицами должно существовать антитяготение[1].

[1] Направление силы, действующей между частицей и античастицей, будет противоположно тому, которое действует между двумя частицами или двумя античастицами. При этом природа

В общей теории относительности источником гравитационного поля является тензор энергии-импульса. В этой теории гравитация не различает частицы и античастицы. Считается, что не только частицы, но и античастицы имеют положительную энергию. С учётом этого в ОТО вклады частиц и античастиц в тензор энергии-импульса суммируются.

В двузнаковой гравитации источником гравитационного поля также является тензор энергии-импульса. Его отличие от тензора энергии-импульса ОТО лишь в одном – вклады частиц и античастиц не суммируются, а вычитаются. В двузнаковой гравитации описание частиц и античастиц является симметричным, при этом античастица рассматривается как частица, но с отрицательной энергией и движущаяся во времени вспять. С учётом этого считается, что «гравитационные заряды» частиц и античастиц имеют противоположные знаки и гравитация является двузнаковой. Запишем уравнения, описывающие эту гравитацию.

## 16.2. Уравнения двузнаковй гравитации

Идейно двузнаковая гравитация близка ОТО. Как и в эйнштейновской гравитации, в двузнаковой гравитации величинами, описывающими гравитационное поле, являются компоненты метрического тензора. Как и в эйнштейновской гравитации, источником гравитационного поля является тензор энергии-импульса частиц и античастиц. Принципиальное отличие двузнаковой гравитации от эйнштейновской заключается в том, что вклады частиц и античастиц в тензор энергии-импульса в правой части уравнений для гравитационного поля не суммируются, а вычитаются. Чтобы различать тензоры энергии-импульса ОТО и двузнаковой гравитации, последний иногда называем тензором заряда-тока.

Согласно двузнаковой гравитации космическая среда современной Вселенной состоит из обычной и вакуумной материи. Обычная материя содержит две компоненты: нерелятивистскую и релятивистскую. Нерелятивистская (барионная) компонента состоит из протонов, нейтронов и электронов, а также их античастиц. Релятивистская компонента включает в себя реликтовое излучение, состоящее из фотонов и антифотонов, и нейтринную компоненту, состоящую из трёх поколений нейтрино и соответствующих им антинейтрино. Вакуумной материей являются то, что составляет физический вакуум. Реальные частицы и античастицы являются возбуждёнными состояниями вакуума. Частицы – состояния с положительной энергией, а античастицы – состояния с отрицательной энергией. В состав космической среды включается лишь то,

---

этих сил не имеет принципиального значения, это следует только из отличия направления течения времени для частиц и для античастиц.

что наблюдается в реальных экспериментах и может быть описано в рамках стандартной теории частиц. Предполагается, что главной компонентой космической среды является вакуум. Считается, что вакуум и Вселенная в целом являются не только электро-, но и гравитационно-нейтральными.

В двузнаковой гравитации описание частиц и античастиц является симметричным. В предельном случае миров и антимиров и неучёте влияния физического вакуума на гравитацию уравнения двузнаковой гравитации переходят в уравнения Эйнштейна.

В двузнаковой гравитации частицы и античастицы имеют гравитационные заряды (энергии) противоположных знаков, поэтому при одинаковых условиях их ускорения равны по величине, но отличаются знаком.

Метрика пространства-времени в представлениях частиц и античастиц не одно и то же. Частицы и античастицы воспринимают отклонения метрики пространства-времени от псевдоевклидовой (гравитационное поле) по-разному. Метрические тензоры в представлениях частиц $g_{\mu\nu}$ и античастиц $\overline{g}_{\mu\nu}$ записываются в виде

$$g_{\mu\nu} = g^0_{\mu\nu} + \delta g_{\mu\nu}, \quad \overline{g}_{\mu\nu} = g^0_{\mu\nu} + \delta \overline{g}_{\mu\nu}, \tag{16.8}$$

где $g^0_{\mu\nu}$ – метрический тензор псевдоевклидового пространства-времени специальной теории относительности, а $\delta g_{\mu\nu}$ и $\delta \overline{g}_{\mu\nu}$ – отклонения метрики, связанные с наличием гравитационного поля. В (16.8) и далее чёрточка над символом означает, что данная величина описывается в представлении античастиц.

Уравнения (16.8) не рассматриваются как описывающие расщепление пространства-времени на два. Они описывают лишь факт различия «восприятия» частицами и античастицами гравитационного поля. Это аналогично тому, как электромагнитное поле электрическими зарядами разного знака воспринимается по-разному, и это не означает, что оно расщепляется на два.

Частные примеры различия представлений частиц и античастиц о метрике искривлённого пространства-времени приведены в п. 16.4 и 16.5.

В двузнаковой гравитации в рамках механики сплошной среды космическая среда рассматривается как двужидкостная. Одна из жидкостей состоит из частиц, другая – из античастиц. Считается, что кроме обычных форм материи, космическая среда содержит вакуумную материю, и она является гравитационно-нейтральной.

Уравнения двузнаковой гравитации в представлении частиц записываются в виде

$$B^{\nu}_{\mu} = R^{\nu}_{\mu} - \frac{1}{2}\delta^{\nu}_{\mu} R = \frac{8\pi G}{c^4}\left(T^{\nu}_{\mu} + \overline{T}^{\nu}_{\mu}\right), \tag{16.9}$$

где $T^{\nu}_{\mu}$ и $\overline{T}^{\nu}_{\mu}$ – вклады в тензор энергии-импульса вещества и антивещества соответственно.

В представлении античастиц уравнения двузнаковой гравитации записываются в симметричном по отношению к (16.9) виде:

$$\bar{B}_{\mu}^{\nu} = \bar{R}_{\mu}^{\nu} - \frac{1}{2}\delta_{\mu}^{\nu}\bar{R} = \frac{8\pi G}{c^4}\left(\bar{T}_{\mu}^{\nu} + T_{\mu}^{\nu}\right), \qquad (16.10)$$

В мирах и антимирах уравнения (16.9) и (16.10) переходят в уравнения Эйнштейна (10.3).

Уравнения (16.9), (16.10) принципиально отличаются от уравнений Эйнштейна в тех случаях, когда нельзя использовать идеализированные приближения миров и антимиров. Это имеет место, когда в космической среде с высокой скоростью идут процессы рождения/уничтожения частиц/античастиц и когда в ней в соизмеримых количествах присутствуют частицы и античастицы. Эти случаи являются, например, типичными для ранней Вселенной, а также для релятивистских стадий эволюции космических объектов.

Левые части уравнений Эйнштейна, а также уравнений (16.9) и (16.10) двузнаковой гравитации удовлетворяют тождествам [46]

$$\nabla_{\nu} B_{\mu}^{\nu} = \bar{\nabla}_{\nu} \bar{B}_{\mu}^{\nu} = 0\,. \qquad (16.11)$$

Учитывая эти тождества, из (16.9), (16.10) заключаем, что в уравнениях двузнаковой гравитации содержатся законы сохранения энергии и импульса обычной материи:

$$\nabla_{\nu}\left(T_{\mu}^{\nu} + \bar{T}_{\mu}^{\nu}\right) = 0\,. \qquad (16.12)$$

Закон (16.12) находится в соответствии с законом сохранения энергии-импульса в релятивистской квантовой теории. При применении этого закона для расчёта элементарных процессов взаимодействия античастицы рассматриваются как частицы, но с отрицательной энергией и движущиеся в обратном направлении по времени. Эта идея содержится в математическом аппарате расчёта амплитуд вероятности того или иного конкретного процесса с использованием диаграмм Фейнмана [65].

Из уравнений (16.12) следует, что в двузнаковой гравитации, в которой гравитация различает частицы и античастицы и предполагается, что их гравитационные заряды определяются энергией, содержится существенное изменение представлений о ней. Энергия является «двузнаковой». В любых процессах имеет место закон сохранения энергии (гравитационного заряда). Гравитационные заряды могут рождаться и уничтожаться, но при этом полный гравитационный заряд Вселенной сохраняется и равен нулю.

В двузнаковой гравитации вакуум симметричен по виртуальным частицам и античастицам. Обычная космическая среда, состоящая из реальных частиц

и античастиц, также в целом симметрична по ним. Вселенная в целом электро- и гравитационно-нейтральна. В то же время во Вселенной существует регулярный механизм разделения частиц и античастиц. Он обусловлен антитяготением между ними. В результате действия антитяготения между частицами и античастицами ранняя Вселенная распалась на миры и антимиры (см. гл. 25).

В гравитационных полях сгустков материи имеет место гравитационная поляризация вакуума. В результате её влияния гравитационные поля претерпевают кардинальные изменения (см. гл. 27).

## 16.3. Закон сохранения энергии-импульса

Учитывая уравнения (16.9) и (16.11), в двузнаковой гравитации естественно считать, что тензор

$$G_{\mu}^{\nu} = -\frac{c^4}{8\pi G} B_{\mu}^{\nu} \tag{16.13}$$

является тензором энергии-импульса вакуума-пространства-времени. С учётом этого, основное уравнение этой теории (16.9) можно записать в виде

$$G_{\mu}^{\nu} + T_{\mu}^{\nu} + \overline{T}_{\mu}^{\nu} = 0 \tag{16.14}$$

и рассматривать его как утверждение о равенстве нулю во всех точках Вселенной и во все моменты времени тензора энергии-импульса всех видов материи, включающих в себя и вакуум.

В двузнаковой гравитации вклад тёмной энергии в тензор энергии-импульса гравитационного поля не учитывается (см. п. 16.10).

В двузнаковой гравитации утверждение о равенстве нулю в некоторой области тензора энергии-импульса всех видов материи, в том числе и вакуума, вовсе не означает, что там ничего нет. В космической среде, состоящей из обычной материи, а также физического вакуума, равенство нулю её полной энергии и давления в любой точке и в любой момент времени достигается за счёт точной компенсации вкладов в тензор энергии-импульса всех её компонент, а вовсе не вследствие их отсутствия.

В двузнаковой гравитации вакуум, состоящий из виртуальных частиц и античастиц, присутствует всегда и везде и является реальным физическим объектом. Там, где вклады реальных частиц и античастиц в энергию и давление не компенсируются, существует, согласно (16.14), гравитационное поле (деформация вакуума). Гравитационное поле – это то, что обеспечивает поддержание значений полной энергии и давления материи в любой точке и в любой

момент времени на нулевом уровне. Гравитационное поле материально. Оно связано с деформацией физического вакуума.

С учётом предлагаемой интерпретации смысла отдельных слагаемых уравнения (16.14) его следует рассматривать как граничное условие для закона сохранения энергии-импульса

$$\left(G_{\mu}^{\nu}+T_{\mu}^{\nu}+\overline{T}_{\mu}^{\nu}\right)_{;\nu}=0 \tag{16.15}$$

материи в целом. Уравнение (16.15) является самым общим уравнением механики космической среды в предположении, что она включает в себя все её компоненты, в том числе и вакуум.

Вопрос об энергии вакуума в отсутствие обычных форм материи рассматривается в гл. 19 и 20. Задача о гравитационных волнах как возмущениях вакуума-пространства-времени в настоящей книге не обсуждается.

## 16.4. Ньютоновское приближение в двузнаковой гравитации

Запишем уравнение для слабых гравитационных полей в представлении частиц.

Предполагаем, что гравитационное поле является слабым и скорости движения вещества/антивещества много меньше скорости света. В этом случае существенными являются лишь компоненты $g_{00}$ и $\overline{g}_{00}$ метрического тензора, и они могут быть записаны в виде [46. §87]

$$g_{00}=1+\frac{2\Phi}{c^2},\quad \overline{g}_{00}=1-\frac{2\Phi}{c^2}, \tag{16.16}$$

где Ф – гравитационный потенциал.

В слабом гравитационном поле важными являются лишь компоненты $\Gamma_{00}^{\alpha}$ ($\alpha$ = 1, 2, 3) символов Кристоффеля:

$$\Gamma_{00}^{\alpha}\approx-\frac{1}{2}g^{\alpha\beta}\frac{\partial g_{00}}{\partial x^{\beta}}=\frac{1}{c^2}\cdot\frac{\partial\Phi}{\partial x^{\alpha}}. \tag{16.17}$$

В нерелятивистском пределе

$$T_{\mu}^{\nu}=\rho c^2 u_{\mu}u^{\nu},\quad \overline{T}_{\mu}^{\nu}=\overline{\rho}c^2\overline{u}_{\mu}\overline{u}^{\nu}, \tag{16.18}$$

где $\rho$ и $\overline{\rho}$ – плотности вещества и антивещества соответственно.

Макроскопическое движение вещества/антивещества считается медленным. Вследствие этого пренебрегаем всеми пространственными компонентами 4-скорости: $u^{\alpha}=\overline{u}^{\alpha}=0$ ($\alpha$ = 1, 2, 3). Учитывается только временная

компонента $u^{\mu}$: $u^0 = \overline{u}^0 = 1$. Из всех компонент $T_{\mu}^{\nu}$ и $\overline{T}_{\mu}^{\nu}$ остаются лишь

$$T_0^0 = \rho c^2, \quad \overline{T}_0^0 = \overline{\rho} c^2 . \tag{16.19}$$

С учётом (16.19) уравнения (16.9) записываем в виде

$$R_0^0 = \frac{4\pi G}{c^2}\left(\rho + \overline{\rho}\right). \tag{16.20}$$

При вычислении $R_0^0$ учитывается [46. § 99], что члены, содержащие произведения символов Кристоффеля $\Gamma_{\mu\nu}^{\alpha}$, во всяком случае являются величинами второго порядка малости. Члены, содержащие производные по $x^0 = ct$, являются малыми по сравнению с содержащими производные по пространственным координатам. Учитывая это, находим

$$R_0^0 = R_{00} = \frac{\partial \Gamma_{00}^{\alpha}}{\partial x^{\alpha}} . \tag{16.21}$$

Подставляя (16.17) в (16.21), получим

$$R_0^0 = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^{\alpha} \partial x_{\alpha}} \equiv \frac{1}{c^2} \cdot \Delta\Phi . \tag{16.22}$$

Учитывая (16.20), (16.22), уравнение для слабых гравитационных полей в представлении частиц записываем в виде

$$\Delta\Phi = 4\pi G\left(\rho + \overline{\rho}\right). \tag{16.23}$$

Для практического использования этого уравнения необходимо дополнительно записать уравнения, описывающие рождение/уничтожение частиц/античастиц, а также уравнения, описывающие их движение. В гл. 25 нерелятивистское приближение в двузнаковой гравитации использовано при решении задачи о распаде Вселенной на миры и антимиры.

## 16.5. Метрика Шварцшильда и метрика К2

Различие представлений частиц и античастиц о метрических свойствах пространства и времени покажем на простом частном примере гравитационного поля точечной массы $M$. Это поле обладает центральной симметрией. Для его описания используем «сферические» пространственные координаты – $r$, $\theta$, $\phi$. В этой системе координат квадрат интервала $ds^2$ может быть записан в виде

$$ds^2 = e^{\nu} c^2 dt^2 - r^2\left(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2\right) - e^{\lambda} dr^2 , \tag{16.24}$$

где $\nu(r, t)$ и $\lambda(r, t)$ – некоторые функции радиальной координаты $r$ и «времени» $t$ [46. §100]. Подразумевая под $x^0$, $x^1$, $x^2$, $x^3$ соответственно координаты $ct$, $r$, $\theta$, $\phi$, имеем для отличных от нуля компонент метрического тензора выражения

$$g_{00} = e^{\nu},\ g_{11} = -e^{\lambda},\ g_{22} = -\ r^{\ 2},\ g_{33} = -r^{\ 2}\sin^2\theta. \qquad (16.25)$$

С учётом (16.25) уравнения Эйнштейна (10.3) для центрально-симметричного поля в вакууме, вне создающей его сферической массы, могут быть записаны в следующем виде [Там же]:

$$e^{-\lambda}\left(\frac{\nu'}{r}+\frac{1}{r^2}\right)-\frac{1}{r^2}=0\,, \qquad (16.26)$$

$$e^{-\lambda}\left(\frac{\lambda'}{r}-\frac{1}{r^2}\right)+\frac{1}{r^2}=0\,, \qquad (16.27)$$

$$\dot{\lambda}=0. \qquad (16.28)$$

Штрих означает дифференцирование по $r$, а точка над буквой – дифференцирование по $ct$. Из этих уравнений следует, что центрально-симметричное поле в пустоте автоматически оказывается статическим.

Уравнения (16.26), (16.27) легко интегрируются и дают

$$e^{\nu}=e^{-\lambda}=1+\frac{\mathrm{const}}{r}. \qquad (16.29)$$

Как и следовало ожидать, на бесконечности ($r \to \infty$) $e^{\nu} = e^{-\lambda} = 1$, то есть вдали от точечной массы $M$ метрика автоматически оказывается галилеевой.

Для слабого гравитационного поля компонента метрического тензора $g_{00}$ может быть записана в виде [Там же. §87]

$$g_{00}=1+\frac{2\Phi}{c^2}. \qquad (16.30)$$

В ньютоновском приближении потенциал $\Phi$ поля точечной массы $M$ имеет вид

$$\Phi=-\frac{GM}{r}. \qquad (16.31)$$

Сила, действующая на массу $m$ в этом поле,

$$F=-m\frac{d\Phi}{dr}=-\frac{GMm}{r^2}. \qquad (16.32)$$

В двузнаковой гравитации считается, что массы $M$ и $m$ для частиц положительны, а для античастиц отрицательны. При этом, согласно (16.32),

одноимённые гравитационные заряды притягиваются, а разноимённые отталкиваются. Далее, для определённости, считаем, что центральное тело имеет массу $M > 0$.

Потенциал поля для античастиц отличается от потенциала поля для частиц знаком. С учётом этого компоненту метрического тензора $\overline{g}_{00}$ в представлении античастиц в ньютоновском приближении записываем в виде

$$\overline{g}_{00} = 1 - \frac{2\Phi}{c^2}. \tag{16.33}$$

Вводя обозначение

$$r_g = \frac{2GM}{c^2} \tag{16.34}$$

и учитывая формулы (16.25), (16.29), (16.30), (16.31), (16.33) и (16.34), находим, что метрика пространства-времени точечной массы $M$ в представлении частиц имеет вид

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_g}{r}\right)c^2 dt^2 - r^2\left(\sin^2\theta d\phi^2 + d\theta^2\right) - \frac{dr^2}{\left(1 - \frac{r_g}{r}\right)}. \tag{16.35}$$

Она была найдена Шварцшильдом (1916 г.) и называется шварцшильдовской.

Метрика этого же пространства-времени, но в представлении античастиц имеет кардинально другой вид:

$$d\overline{s}^2 = \left(1 + \frac{r_g}{r}\right)c^2 dt^2 - r^2\left(\sin^2\theta d\phi^2 + d\theta^2\right) - \frac{dr^2}{\left(1 + \frac{r_g}{r}\right)}. \tag{16.36}$$

Эта метрика, в отличие от шварцшильдовской, описывает не поле притяжения, а поле отталкивания. Далее эту метрику будем, для краткости, называть метрикой К2.

Решения (16.35) и (16.36) справедливы не только для покоящихся сферических масс, но и для движущихся масс, если это движение сохраняет их сферическую симметрию. Эти решения справедливы во внешней области по отношению к центральной массе $M$. Метрики (16.35) и (16.36) зависят только от полной массы гравитирующего тела $M$. В двузнаковой гравитации учитывается, что вклады частиц и античастиц в массу (энергию) центрального тела берутся с противоположным знаком.

**Масштабы в центральном поле**. В ОТО, не различающей частицы и античастицы, вопроса о том, из чего состоят масштабы и часы, используемые для измерений длин и времени, не возникает. Принципиально другая ситуация

в двузнаковой гравитации, различающей частицы и античастицы. Различие в этой теории представлений частиц и античастиц о метрических свойствах пространства-времени связано с различием влияния на них гравитационного поля. Согласно двузнаковой гравитации масштабы и часы, сделанные из вещества и антивещества, в гравитационном поле ведут себя совершенно по-разному. Рассмотрим это на примере поля точечной массы $M > 0$.

В представлении частиц пространственная метрика поля точечной массы $M$ имеет вид

$$dl^2 = \frac{dr^2}{\left(1 - \frac{r_g}{r}\right)} + r^2\left(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2\right). \tag{16.37}$$

В то же время пространственная метрика этого же поля, но в представлении античастиц определяется формулой

$$d\bar{l}^2 = \frac{dr^2}{\left(1 + \frac{r_g}{r}\right)} + r^2\left(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2\right). \tag{16.38}$$

Отметим, что геометрический смысл координаты $r$ в обоих случаях определяется тем, что длина окружности с центром в центре поля равна $2\pi r$.

Согласно (16.37) расстояние между двумя точками $r_1$ и $r_2$ на одном и том же радиусе, для масштаба, состоящего из вещества, даётся интегралом

$$l_{12} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{\left(1 - \frac{r_g}{r}\right)^{\frac{1}{2}}} > r_2 - r_1. \tag{16.39}$$

Если масштаб из вещества, расположенный радиально в центральном поле массы $M > 0$, переносить из области больших $r$ в область малых $r$, то будет иметь место его растяжение.

Принципиально другая ситуация будет иметь место для масштаба, состоящего из антивещества. Согласно (16.38) расстояние между двумя точками $r_1$ и $r_2$ на одном и том же радиусе для масштаба, состоящего из антивещества, даётся интегралом

$$\bar{l}_{12} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{\left(1 + \frac{r_g}{r}\right)^{\frac{1}{2}}} < r_2 - r_1. \tag{16.40}$$

Если стержень из антивещества, расположенный радиально в центральном поле массы $M > 0$, переносить из области больших $r$ в область малых $r$,

то будет иметь место его сжатие, а не растяжение, как это имеет место для масштаба из вещества.

Различие в представлениях частиц и античастиц о геометрических свойствах искривлённого пространства, связанного с наличием гравитационного поля, обусловлено различием влияния этого поля на них.

**Часы в гравитационном поле**. Как видно из (16.30), (16.31) и (16.33), в гравитационном поле массы $M > 0$ в представлении частиц $g_{00} \leqslant 1$, а в представлении античастиц $\overline{g}_{00} \geqslant 1$.

Истинное время $d\tau$, отсчитываемое часами, состоящими из вещества, связано с мировым временем $dt$ формулой [46. § 84]

$$d\tau = \frac{1}{c}\sqrt{g_{00}}dt\,. \tag{16.41}$$

Поскольку $g_{00} \leqslant 1$, то

$$d\tau \leqslant dt. \tag{16.42}$$

Знак равенства имеет место на бесконечности, где $t$ совпадает с истинным временем $\tau$. Учитывая (16.30), (16.31), (16.41), заключаем, что на конечных расстояниях от массы происходит «замедление» хода часов по сравнению с их темпом на бесконечности. Замедление времени тем значительнее, чем ближе часы к точечной массе.

Принципиально другая ситуация для истинного времени $d\overline{\tau}$, отсчитываемого часами, состоящими из антивещества. Для этих часов, называемых далее для краткости античасами, истинное время $d\overline{\tau}$, связано с мировым временем $dt$ формулой

$$d\overline{\tau} = \frac{1}{c}\sqrt{\overline{g}_{00}}dt\,. \tag{16.43}$$

Поскольку $\overline{g}_{00} \geqslant 1$, то

$$d\tau \geqslant dt. \tag{16.44}$$

Учитывая, что $\overline{g}_{00} \geqslant 1$, заключаем, что в гравитационном поле положительной массы происходит «ускорение» хода античасов по сравнению с их темпом на бесконечности. Ускорение времени тем значительнее, чем ближе античасы к этой массе.

## 16.6. Геодезические для частиц и античастиц

Частица, находящаяся в гравитационном поле, не только подвергается воздействию со стороны поля, но и сама влияет на поле, изменяя его. Однако если гравитационный заряд частицы невелик, то его действием на поле можно пренебречь. В этом случае, рассматривая движение частицы в заданном поле, можно считать, что само поле не зависит ни от координат, ни от скорости частицы. Аналогичные рассуждения справедливы и для античастиц.

Уравнение движения частицы в гравитационном поле находится путём соответствующего обобщения дифференциального уравнения свободного движения частицы в специальной теории относительности. Это уравнение гласит: $du^i = 0$, где $u^i = dx^i/ds$ есть 4-скорость частицы. В искривлённом пространстве-времени это уравнение обобщается и записывается в виде

$$Du^i = 0, \tag{16.45}$$

где $Du^i$ – ковариантный дифференциал 4-вектора скорости $u^i$ [46]. Как известно,

$$Du^i = du^i + \Gamma^i_{kl} dx^k dx^l . \tag{16.46}$$

Учитывая (16.45), (16.46), находим

$$\frac{d^2 x^i}{ds^2} + \Gamma^i_{kl} \frac{dx^k}{ds} \frac{dx^l}{ds} = 0 . \tag{16.47}$$

Это и есть искомые уравнения движения для частицы в гравитационном поле. Видно, что движение частицы в гравитационном поле определяется величинами $\Gamma^i_{kl}$. В представлении частиц уравнение (16.47) является уравнением геодезических.

Частицы и античастицы в двузнаковую гравитацию входят равноправно. Учитывая это, уравнения, описывающие движение античастиц в гравитационном поле в их представлении, записываем в виде

$$\frac{d^2 \overline{x}^i}{ds^2} + \overline{\Gamma}^i_{kl} \frac{d\overline{x}^k}{ds} \frac{d\overline{x}^l}{ds} = 0 , \tag{16.48}$$

где $\overline{x}^i$ – координаты античастицы в четырёхмерном пространстве-времени.

В двузнаковой гравитации частицы и античастицы имеют гравитационные заряды разных знаков. Вследствие этого, 4-ускорения частиц и античастиц в любой точке пространства-времени, обусловленные его кривизной, при одинаковых скоростях равны по величине, но отличаются знаками.

В собственном представлении частицы и античастицы в гравитационном поле движутся по геодезическим. Но представления частиц и античастиц

о метрике пространства-времени отличаются. В любой точке гравитационного поля 4-ускорения частиц и античастиц равны по величине, но противоположны по знаку. Одно и то же гравитационное поле частицы и античастицы воспринимают по-разному. Понятие геодезической не является абсолютным. Геодезические для частиц и античастиц не совпадают.

Запишем уравнения, описывающие движения частиц и античастиц в слабом гравитационном поле, а также в центрально-симметричном поле.

## 16.7. Слабое гравитационное поле

Если гравитационное поле является слабым и скорости движения частиц/античастиц много меньше скорости света, то существенными являются лишь компоненты $g_{00}$ и $\overline{g}_{00}$ метрического тензора. В этом случае они могут быть записаны в виде [46. §87]

$$g_{00} = 1 + \frac{2\Phi}{c^2}, \quad \overline{g}_{00} = 1 - \frac{2\Phi}{c^2}, \tag{16.49}$$

где Ф – гравитационный потенциал. В слабом гравитационном поле важными являются лишь компоненты $\Gamma^{\alpha}_{00}$ и $\overline{\Gamma}^{\alpha}_{00}$ ($\alpha = 1, 2, 3$) символов Кристоффеля [Там же. §99].

Для слабых гравитационных полей

$$\Gamma^{\alpha}_{00} \approx -\frac{1}{2} g^{\alpha\beta} \frac{\partial g_{00}}{\partial x^{\beta}} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial x^{\alpha}}, \quad \overline{\Gamma}^{\alpha}_{00} = -\frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial \overline{x}^{\alpha}}. \tag{16.50}$$

Учитывая (16.8) и (16.50), уравнения (16.47) и (16.48), определяющие движение частиц и античастиц в гравитационном поле, запишем в виде

$$\frac{d^2 x^{\alpha}}{dt^2} = -\frac{\partial \Phi}{\partial x^{\alpha}}, \tag{16.51}$$

$$\frac{d^2 \overline{x}^{\alpha}}{dt^2} = +\frac{\partial \Phi}{\partial \overline{x}^{\alpha}}. \tag{16.52}$$

Из (16.51) и (16.52) следует, что частицы и античастицы в заданном гравитационном поле движутся по разным траекториям. Ускорения, которые они приобретают в любой точке гравитационного поля, равны по величине, но противоположны по знаку. Это является следствием различия знаков гравитационных зарядов частиц и античастиц. В то же время уравнения движения для всех частиц являются одинаковыми и не зависят от их массы и состава. То же самое справедливо и для античастиц.

## 16.8. Центрально-симметричное гравитационное поле

Поле точечной массы $M > 0$ является полем притяжения для частиц и полем отталкивания для античастиц. Как и во всяком центральном поле, движение частиц/античастиц будет происходить в одной «плоскости», проходящей через центр поля. Выберем эту плоскость в качестве плоскости $\theta = \pi/2$.

Для определения траектории частиц/античастиц воспользуемся уравнением Гамильтона – Якоби для действия $S$ как функции координат и времени. Оно имеет вид [46]

$$g^{ik}\frac{\partial S}{\partial x^i}\frac{\partial S}{\partial x^k} - m^2c^2 = 0, \tag{16.53}$$

где $m$ – масса частиц/античастиц. Массу центрального тела обозначаем здесь как $M$, считаем, что $M > 0$. Учитывая (16.35) и (16.53), уравнение движения частицы ($m \geqslant 0$) запишем в виде

$$\left(1-\frac{r_g}{r}\right)^{-1}\left(\frac{\partial S}{c\partial t}\right)^2 - \left(1-\frac{r_g}{r}\right)\left(\frac{\partial S}{\partial r}\right)^2 - \frac{1}{r^2}\left(\frac{\partial S}{\partial \phi}\right)^2 - m^2c^2 = 0, \tag{16.54}$$

где $r_g = 2MG/c^2$ – гравитационный радиус центрального тела. Уравнение (16.54) описывает движение частицы в гравитационном поле притяжения. Решение этого уравнения приведено в [Там же. § 101].

Учитывая (16.36) и (16.53), уравнение движения античастицы ($m < 0$) в гравитационном поле массы ($M > 0$) запишем в виде

$$\left(1+\frac{r_g}{r}\right)^{-1}\left(\frac{\partial S}{c\partial t}\right)^2 - \left(1+\frac{r_g}{r}\right)\left(\frac{\partial S}{\partial r}\right)^2 - \frac{1}{r^2}\left(\frac{\partial S}{\partial \phi}\right)^2 - m^2c^2 = 0. \tag{16.55}$$

По общим правилам решения уравнения Гамильтона – Якоби [45. § 47] ищем $S$ в виде

$$S = -E_0 t + L\phi + S_r(r) \tag{16.56}$$

с постоянными энергией $E_0$ и моментом импульса $L$. Подставив (16.56) в (16.55), найдём производную $dS_r/dr$ и затем

$$S_r = \int\left[\frac{E_0^2}{c^2}\left(1+\frac{r_g}{r}\right)^{-2} - \left(m^2c^2 + \frac{L^2}{r^2}\right)\left(1+\frac{r_g}{r}\right)^{-1}\right]^{1/2} dr. \tag{16.57}$$

Зависимость $r = r(t)$ даётся, как известно [Там же. § 47], уравнением $\partial S/\partial E_0 = \text{const}$, откуда

$$ct = \frac{E_0}{|m|c^2}\int \frac{dr}{\left(1+\frac{r_g}{r}\right)\left[\left(\frac{E_0}{mc^2}\right)^2 - \left(1+\frac{L^2}{m^2c^2r^2}\right)\left(1+\frac{r_g}{r}\right)\right]^{1/2}}. \qquad (16.58)$$

Траектория же определяется уравнением $\partial S/\partial L = \text{const}$, откуда

$$\phi = \int \frac{L}{r^2}\left[\frac{E_0^2}{c^2} - \left(m^2c^2 + \frac{L^2}{r^2}\right)\left(1+\frac{r_g}{r}\right)\right]^{-1/2} dr. \qquad (16.59)$$

Формулы (16.58) и (16.59) дают аналитическое описание движения античастиц в поле точечной массы, состоящей из вещества. Считается, что $M \gg |m|$.

В настоящей книге рассматриваются приложения двузнаковой гравитации к космологии. Задачи о движении частиц и античастиц в полях антитяготения обсуждаются кратко. Показано, как в принципе такие задачи могут быть рассмотрены в рамках двузнаковой гравитации.

## 16.9. Отрицательные массы

В классической механике утверждается, что масса не может быть отрицательной [45]. Считается, что согласно принципу наименьшего действия для действительного движения частицы из точки 1 пространства в точку 2 интеграл

$$S = \int_1^2 \frac{mv^2}{2}\,dt \qquad (16.60)$$

имеет минимум. Утверждается, что если бы масса $m$ была отрицательной, то для траектории, по которым частица сначала быстро удаляется от 1, а затем быстро приближается к 2, интеграл действия принимал бы сколь угодно большие по абсолютной величине отрицательные значения, то есть не имел бы минимума. И это правильно, если считать, что время для частиц с отрицательной энергией (античастиц) течёт в том же направлении, что и для частиц с положительной энергией. Если же, следуя Фейнману, считать, что время для античастиц течёт в обратном направлении, то очевидно, что принцип наименьшего действия будет выполняться не только для частиц ($m > 0$), но и для античастиц ($m < 0$), и утверждение о невозможности существования отрицательных масс является ложным.

В п. 2.6 приведены качественные соображения о разумности идеи о полной симметрии между состояниями с положительной и отрицательной энергиями. Эта идея является основополагающей не только в релятивистской квантовой механике [21], но и в двузнаковой гравитации.

## 16.10. Тёмная энергия и двузнаковая гравитация

Если гипотетически считать, что космологическая постоянная $\Lambda$ отлична от нуля, то тензор энергии-импульса вакуума-пространства-времени

$$G_{\mu}^{\nu} = -\frac{c^4}{8\pi G}(B_{\mu}^{\nu} - \delta_{\mu}^{\nu}\Lambda). \tag{16.61}$$

В этом тензоре учтён вклад не только гравитационно-нейтральной вакуумной материи, но и тёмной энергии.

Тензор энергии-импульса тёмной энергии

$$G_{\mu(\Lambda)}^{\nu} = \frac{c^4\Lambda}{8\pi G}\delta_{\mu}^{\nu}. \tag{16.62}$$

В гл. 20 показано, что в двузнаковой гравитации естественно считать, что космологическая постоянная $\Lambda \equiv 0$. В этой теории считается, что вакуум состоит лишь из гравитационно-нейтральной вакуумной материи. Присутствие в нём тёмной энергии не предполагается.

В следующей главе дано описание космологической модели, в основе которой лежит двузнаковая гравитация. В силу простоты этой модели она названа S-моделью (S – Simple).

# ГЛАВА 17
# МОДЕЛЬ ГРАВИТАЦИОННО-НЕЙТРАЛЬНОЙ ВСЕЛЕННОЙ

## 17.1. Предположения

В основе S-модели лежат следующие предположения.

- Динамика Вселенной описывается двузнаковой гравитацией, различающей частицы и античастицы.
- Главной компонентой космической среды во Вселенной является вакуум. Он электро- и гравитационно-нейтрален. Частицы и античастицы являются его возмущёнными состояниями: частицы – состояниями с положительной энергией, а античастицы – с отрицательной.
- Вселенная однородна и изотропна.
- Вселенная симметрична по частицам и античастицам, как реальным, так и виртуальным. Их вклады в создание космологического гравитационного поля сокращаются, вследствие этого Вселенная в целом является гравитационно-нейтральной.

## 17.2. Исходные уравнения

С учётом сделанных в п. 17.1 предположений уравнения двузнаковой гравитации (16.2) стандартным образом преобразуются в космологические уравнения Фридмана для гравитационно-нейтральной Вселенной:

$$3\left(\frac{\dot{a}^2}{a^2}+\frac{kc^2}{a^2}\right)=0\,, \tag{17.1}$$

$$2\frac{\ddot{a}}{a}+\frac{\dot{a}^2}{a^2}+\frac{kc^2}{a^2}=0\,. \tag{17.2}$$

Нестационарные решения этих уравнений существуют лишь при значении параметра $k = -1$. Согласно S-модели нестационарная однородная изотропная Вселенная является псевдосферической. Так как в правых «материальных» частях уравнений (17.1) и (17.2) стоят нули, их формально можно рассматривать как описывающие динамику искривлённого однородного псевдосферического пространства, свободного от обычных форм материи. Реально, конечно, в правых частях этих уравнений содержатся вклады частиц и античастиц, но в симметричной гравитационно-нейтральной Вселенной эти вклады сокращаются. Уравнения (17.1) и (17.2), при $k = -1$, могут быть записаны

в предельно простом виде

$$\dot{a}^2 = c^2, \quad \ddot{a} = 0. \tag{17.3}$$

Решение этих уравнений с граничными условиями

$$a(t_0) = a_0, \quad \dot{a}(t_0) = H_0 a_0, \tag{17.4}$$

имеет вид

$$a(t) = ct, \quad t_0 = H_0^{-1}, \tag{17.5}$$

где $t_0$ – возраст современной Вселенной, $H_0$ – постоянная Хаббла.

В гравитационно-нейтральной Вселенной имеет место равновесие сил притяжения и отталкивания, вследствие этого она расширяется равномерно.

Уравнения (17.3), описывающие S-модель, не содержат свободных параметров. В то же время при их использовании для объяснения наблюдений через граничные условия (17.4) в S-модель вводится параметр $H_0$. Он обеспечивает калибровку времени. За единицу времени берётся возраст Вселенной.

## 17.3. Динамика гравитационно-нейтральной Вселенной

При $k = -1$ уравнения (17.1) и (17.2) могут быть записаны в виде

$$3\left(\frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{0 \cdot c^2}{a^2}\right) = \frac{8\pi G}{c^2}\varepsilon_N, \tag{17.6}$$

$$2\frac{\ddot{a}}{a} + \left(\frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{0 \cdot c^2}{a^2}\right) = -\frac{8\pi G}{c^2}P_N, \tag{17.7}$$

где

$$\varepsilon_N = \frac{3c^4}{8\pi G}\frac{1}{a^2}, \quad P_N = -\frac{1}{3}\varepsilon_N. \tag{17.8}$$

Уравнения (17.6), (17.7) могут быть истолкованы как описывающие динамику однородной изотропной Вселенной, трёхмерное пространство которой является плоским, но не пустым. Оно заполнено материей, термодинамические свойства которой определяются формулами (17.8). Эта необычная материя связана с глобальной однородной искривлённостью трёхмерного пространства Вселенной. Согласно (17.5) радиус кривизны гравитационно-нейтральной Вселенной увеличивается со скоростью света.

Если слагаемые, описывающие гравитационно-нейтральную материю из правых «материальных» частей уравнений Фридмана (17.6), (17.7) перенести в левую, то там они будут описывать отрицательную кривизну однородного пустого псевдосферического трёхмерного пространства. При таком изменении формы записи уравнений Фридмана материя исчезает, но зато появляется кривизна. Полагаем, что материя не исчезает, а кривизну трёхмерного пространства следует трактовать как связанную с существованием во Вселенной глобального нестационарного гравитационного поля. С учётом этого формулы (17.8) рассматриваем как определяющие параметры нестационарного гравитационного поля Вселенной: плотность энергии этого поля и его давление.

Кроме космологического гравитационного поля, параметры которого описываются формулами (17.8), во Вселенной теоретически может существовать и другое космологическое поле. Оно описывается Λ-членом уравнений Эйнштейна и связано с неустранимой кривизной четырёхмерного пространства-времени $R_4$ $(\Lambda = -\frac{1}{4}R_4)$. В современной космологии это поле трактуют как связанное с наличием тёмной энергии, параметры которой определяются формулами (13.5).

Материи, связанные с кривизной пространства и кривизной пространства-времени, по-разному влияют на динамику Вселенной. Влияние первой из них приводит к равномерному росту радиуса кривизны Вселенной, тогда как влияние второй приводит к его экспоненциальному росту. Обычно в физике считается, что если система уравнений имеет решения, некоторые из которых являются экспоненциально растущими, то их как нефизичные отбрасывают. Например, так поступают в квантовой механике. Возможно, имея это в виду, влияние тёмной энергии на динамику Вселенной учитывать не следует. Имеются и другие соображения, указывающие на нецелесообразность учёта тёмной энергии в двузнаковой гравитации (см. п. 20.4).

В [34] высказана гипотеза о том, что во Вселенной количество гравитационно-нейтральной материи может быть бóльшим, чем это следует из уравнений Эйнштейна для вакуума. Предполагается, что гравитационно-нейтральная материя может быть связана не только с вакуумной, но и с обычной материей.

С учётом этой гипотезы, в случае однородной изотропной открытой Вселенной параметры гравитационно-нейтральной среды определяются формулами

$$\varepsilon_N = \frac{3c^4}{8\pi G}\frac{\gamma^2}{a^2}, \quad P_N = -\frac{1}{3}\varepsilon_N, \tag{17.9}$$

где γ – некоторая универсальная постоянная. Динамика Вселенной, заполненной гравитационно-нейтральной материей вида (17.9) определяется уравнением

$$a(t) = \gamma ct. \tag{17.10}$$

Вариант S-модели, основанный на этом уравнении, кроме постоянной Хаббла, содержит дополнительно свободный параметр $\gamma$. Значение этого параметра может быть найдено в процессе применения теории для объяснения наблюдений.

В процессе эволюции Вселенной физические параметры материи, заполняющей Вселенную, меняются кардинально. В формулы, определяющие её свойства, входят скорость света $c$, постоянная Планка $\hbar$, гравитационная постоянная $G$, космологическая постоянная $\Lambda$, а также величины, задающие параметры частиц и античастиц. Считается, что эти величины являются универсальными константами. Это предположение, лежащее в основе современной физической теории, неявно содержит в себе идею, согласно которой физические свойства космической среды не влияют на значения универсальных констант. Имея в виду, что в нестационарной Вселенной её параметры изменяются в широчайших пределах, можно усомниться в правильности этого предположения.

В двузнаковой гравитации считается, что главной компонентой космической среды во Вселенной является вакуум, а частицы и античастицы являются его возмущёнными состояниями. Естественно предполагать, что свойства вакуума и значения констант физической теории взаимосвязаны. Изменение в процессе эволюции Вселенной физических свойств вакуума может приводить к изменению величин, которые в современной теории считаются универсальными константами.

Уже давно П. А. М. Дирак высказал идею о возможном изменении гравитационной постоянной в процессе эволюции Вселенной [84]. Рассматривались и другие варианты переменности фундаментальных констант [62; 87]. Эта переменность, по-видимому, должна явно проявляться в областях экстремальных параметров материи, когда взаимодействие обычной и вакуумной форм материи оказывается сильным.

Как и в $\Lambda$CDM-модели, в S-модели эволюция Вселенной начинается с Большого взрыва. Наличие этой сингулярности в этих моделях считаем их пороком. Возможные способы её устранения в монографии не обсуждаются. Отметим лишь, что, по-видимому, правильное решение проблемы сингулярностей в теории гравитации будет найдено в результате построения квантовой теории гравитации. Возможно, что объединение двузнаковой гравитации и квантовой теории будет более успешным, чем объединение ОТО и квантовой теории. Для этого есть предпосылки. Двузнаковая гравитация, с точки зрения описания физических свойств материи, идейно ближе к квантовой теории, чем общая теория относительности.

# ГЛАВА 18

# ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ В КОСМОЛОГИИ

## 18.1. Используемые космологические модели

Интерпретация наблюдений в космологии осуществляется в рамках космологической модели Вселенной. Модель основана на существующих знаниях о распределении и составе элементов, составляющих Вселенную, а также законах, определяющих их взаимодействие и эволюцию. Практика применения модели для объяснения различных наблюдений позволяет составить объективное суждение о правильности или ложности основополагающих принципов, лежащих в её основе.

В этой главе покажем, что объяснение ключевых для космологии наблюдений в рамках ΛCDM-модели достигается за счёт подгонки пяти параметров. В рамках S-модели, основанной на двузнаковой гравитации, эти наблюдения объясняются значительно проще за счёт подбора лишь одного хорошо измеряемого параметра – постоянной Хаббла (возможно, двух, если считать, что параметр $\gamma \neq 1$ (см. п. 17.3)).

## 18.2. Возраст Вселенной

Обработка многочисленных данных о физических свойствах наблюдаемых звёзд указывает (если правильным является существующее понимание законов их эволюции), что наиболее «старые» из них имеют возраст не менее 11–12 млрд лет.

Оценка максимального возраста долгоживущих радиоактивных элементов указывает на то, что их образование, по-видимому, также произошло приблизительно 11–12 млрд лет назад. Примерно 1–2 млрд лет, как полагают, занимал период эволюции Вселенной, когда ещё не было ни звёзд, ни тяжёлых радиоактивных элементов, образовавшихся, как считается, в процессе эволюции звёзд.

Основываясь на приведённых выше данных, а также на их теоретической интерпретации, в современной космологии возраст Вселенной оценивают приблизительно в 14 млрд лет [19; 27].

Чтобы рассчитать возраст Вселенной в рамках ΛCDM-модели, решают космологические уравнения Фридмана (14.7), (14.8), описывающие эту модель, с граничными условиями (14.10). Для получения предполагаемого возраста Вселенной в районе $(14–15) \cdot 10^9$ лет проводится подбор пяти параметров

модели. Естественно, что при таком количестве параметров это легко достигается и притом бесконечным количеством способов. Даже если предположить, что возраст Вселенной известен совершенно точно, то это не позволяет однозначно определить значения параметров ΛCDM-модели и сделать её определённой. Возраст один, а параметров много.

Совершенно другая ситуация с объяснением возраста Вселенной в рамках S-модели. В этой модели возраст Вселенной $t_0$ однозначно связан со значением постоянной Хаббла $H_0$ формулой

$$t_0 = H_0^{-1}. \tag{18.1}$$

Из наблюдательных данных следует, что значение $H_0$ лежит в интервале 65–70 км/(с · Мпк). Согласно (18.1) ему соответствует значение $t_0$, лежащее в интервале $(14–15)\cdot 10^9$ лет. Это согласуется с современными данными о возрасте Вселенной. Постоянная Хаббла имеет то значение, которое она и должна иметь! Отметим, что для объяснения возраста Вселенной нет необходимости в усложнении S-модели введением гипотезы о значении параметра $\gamma \neq 1$ (см. п. 17.3). Этот параметр не влияет на возраст Вселенной.

## 18.3. Зависимость «звёздная величина – красное смещение»

Эффективный способ проверки соответствия космологической модели реальности основан на сравнении теоретически рассчитанной в рамках модели и наблюдаемой зависимости: «видимая звёздная величина – красное смещение» [19; 27]. В расчётах используется формула, определяющая эту зависимость для источника, чья абсолютная светимость предполагается известной. Вид этой зависимости определяется функцией $a(t)$, определяющей динамику расширения Вселенной. Приведём вывод этой формулы.

В однородной расширяющейся Вселенной длина волны λ фотона, испущенного в момент времени $t$, и его длина волны $\lambda_0$, регистрируемая наблюдателем в момент времени $t_0$, связаны соотношением

$$\lambda_0/\lambda = a_0/a. \tag{18.2}$$

Величины $a$ и $a_0$ определяют масштаб Вселенной в момент времени $t$ и $t_0$, соответственно.

Красное смещение наблюдаемого объекта определяется формулой

$$z = (\lambda_0 - \lambda)/\lambda = a_0/a - 1. \tag{18.3}$$

Чем дальше находился объект, излучивший фотоны, тем дольше эти фотоны летели в расширяющейся Вселенной, тем больше отношение $a_0/a(t)$ и тем больше его красное смещение.

Красное смещение $z$ объекта – непосредственно определяемая величина. Измерение $z$ сводится к идентификации линии или системы линий излучения (или поглощения) атомов и определению того, насколько они смещены в область длинных волн. Формулы (18.2) и (18.3) имеют общий характер и справедливы при любых $z$.

В ΛCDM-модели предполагается, что Вселенная является открытой, и используется метрика [19]

$$ds^2 = c^2dt^2 - a^2(t)\left\{\left(d\chi\right)^2 + \mathrm{sh}^2\,\chi\left[\left(d\theta\right)^2 + \sin^2\theta\left(d\phi\right)^2\right]\right\}. \qquad (18.4)$$

Основания для такого предположения следующие. В случае отсутствия космологических сил отталкивания условием реализации замкнутой модели Вселенной является выполнение неравенства $\Omega_M + \Omega_{rad} > 1$. Оно выполняется, если плотность космической среды больше, чем критическая [19; 27]. Естественно думать, что при учёте сил отталкивания (Λ-члена) значение $\Omega_M + \Omega_{rad}$, при котором Вселенная может быть замкнутой, должно быть бóльшим, чем в случае их отсутствия, то есть большим единицы.

В параметре $\Omega_M$ содержится вклад двух составляющих: «барионной компоненты» и «тёмной материи». Оценка вклада «барионной компоненты» в $\Omega_M$, основанная на наблюдениях, показывает, что он приблизительно равен 0,04–0,05. С другой стороны для интерпретации многочисленных наблюдательных данных [19; 27; 70] приходится предполагать, что количество «тёмной материи» не менее чем в пять-шесть раз превосходит количество видимой «барионной компоненты». С учётом вклада «тёмной материи» полагают, что значение параметра $\Omega_M$ лежит в области 0,24–0,27 [77; 101].

В современной космологии считается, что вклад релятивистской компоненты в полную плотность энергии современной Вселенной весьма мал. Предполагается, что значение параметра $\Omega_{rad} \approx (4{,}2/h^2)\cdot 10^{-5}$ [19. Гл. 4].

С учётом приведённых выше данных о значениях параметров $\Omega_M$ и $\Omega_{rad}$ заключают, что плотность космической среды меньше критической, а поэтому Вселенная является открытой. Это служит основанием для использования метрики (18.4) при описании геометрии Вселенной в ΛCDM-модели.

Согласно S-модели Вселенная также является открытой. Она однородно заполнена гравитационно-нейтральной средой. Имеет место её равномерное расширение.

Площадь поверхности, через которую пролетают фотоны, испущенные источником, имеющим красное смещение $z$, определяется формулой

$$S\left(z\right) = 4\pi r^2\left(z\right). \qquad (18.5)$$

С учётом вида метрики (18.4)

$$r(z) = a_0 \operatorname{sh} \chi(z), \tag{18.6}$$

где $a_0 = a(t_0)$ – масштаб современной Вселенной. Взяв за единицу измерения длины величину $cH_0^{-1}$, запишем $r(z)$ в безразмерном виде:

$$\overline{r}(z) = r(z) / (cH_0^{-1}). \tag{18.7}$$

Плотность потока фотонов, падающих на приёмник, пропорциональна $1/S(z)$. Вследствие красного смещения энергия каждого регистрируемого фотона $\hbar\omega$ отличается от энергии испущенного фотона $\hbar\omega_0$. Эти энергии связаны соотношением

$$\hbar\omega \ / \ \hbar\omega_0 = a \ / \ a_0 = (1+z)^{-1}. \tag{18.8}$$

Видно, что энергия каждого принимаемого фотона в $(1 + z)^{-1}$ раз меньше его энергии в момент испускания. Дополнительно видимая яркость объекта, имеющего красное смещение $z$, ещё уменьшена на фактор $(1 + z)^{-1}$. Это связано с тем, что единице времени приёмника соответствует время $(1 + z)^{-1}$ излучателя [27. Гл. 3].

Учитывая вышесказанное, формулу, определяющую видимую яркость $E$ источника, имеющего абсолютную светимость $L$ и красное смещение $z$, без учёта поглощения и рассеяния фотонов, записываем в виде

$$E = L/[(1 + z)^2 S(z)]. \tag{18.9}$$

Астрономы используют не величину $E$, а звёздные величины $m$. По определению,

$$m = -2{,}5 \lg E + \text{const}. \tag{18.10}$$

Чтобы в зависимости $m(z)$ выделить влияние факторов, определяющих эволюцию Вселенной, и исключить влияние факторов, определяющих светимость наблюдаемого объекта, рассматривают объекты, имеющие определённую абсолютную светимость («стандартные свечи»). Кроме звёздной величины для этих объектов вводится понятие абсолютной звёздной величины $M$. Величина $M$ – это есть $m$ при условии, что источник находится на расстоянии 10 пк от наблюдателя. По определению

$$M = -2{,}5 \lg E_1 + \text{const}, \tag{18.11}$$

где $E_1 = L/4\pi l_0^2$ , $l_0$ = 10 пк. Учитывая формулы (18.7), (18.9)–(18.11), находим

$$(m - M)(z) = 5\lg\left[(1+z)\overline{r}(z)\right] + 5\lg\left(\frac{cH_0^{-1}}{l_0}\right). \qquad (18.12)$$

В зависимости $(m - M)(z)$ влияние факторов, определяющих свойства наблюдаемых объектов, исключены, и остаётся лишь зависимость от факторов, определяющих расширение Вселенной. Формулу (18.12) используем для теретического расчёта зависимости $(m - M)(z)$ в рамках S- и ΛCDM-моделей.

Чтобы найти расстояние $\overline{r}(z)$, входящее в (18.12), необходимо вычислить функцию $\chi(z)$ (см. формулы (18.6), (18.7)). Функция $\chi(z)$ однозначно связана с масштабом $a(t)$, определяющим динамику Вселенной. Для фотона, движущегося к приёмнику, который находится в начале системы координат $\chi$, $\theta$, $\phi$, справедливо уравнение

$$ds^2 = c^2dt^2 - a^2(t)d\chi^2 = 0. \qquad (18.13)$$

Отсюда находим

$$d\chi = -cdt / a(t). \qquad (18.14)$$

Знак минус взят потому, что рассматриваются лучи, приходящие к наблюдателю, находящемуся в начале системы координат.

Используя (18.3), от переменной $t$ переходим к переменной $z$, получаем

$$dt = \frac{a^2dz}{a_0\left(da/dt\right)} \qquad (18.15)$$

и формулу (18.14) записываем в виде

$$d\chi = -\frac{cdz}{a_0(\dot{a}/a)}. \qquad (18.16)$$

Отсюда находим функцию

$$\chi(z) = c\int_0^z \frac{dz'}{a_0(\dot{a}/a)_{z'}}. \qquad (18.17)$$

Точка над буквой обозначает дифференцирование по времени.

**Зависимость $(m - M)(z)$ в ΛCDM-модели.** Для расчёта зависимости $(m - M)_\Lambda(z)$ предварительно вычисляем функцию $r(z)$. Учитывая (18.6), (18.7), (18.17) и (14.7), формулу, определяющую расстояние $\overline{r}(z)$ до наблюдаемого объекта, имеющего красное смещение $z$, запишем в виде

$$\overline{r}_{\Lambda}(z) = \frac{1}{\sqrt{\Omega_{curv}}} \operatorname{sh} \int_{0}^{1+z} \frac{\sqrt{\Omega_{curv}}\, dz'}{\sqrt{\Omega_{curv} z'^2 + \Omega_M z'^3 + \Omega_{rad} z'^4 + \Omega_{\Lambda}}}. \qquad (18.18)$$

Здесь и далее величины, рассчитанные в рамках ΛCDM-модели, обозначаются индексом Λ.

Параметры $\Omega_M$, $\Omega_{curv}$, $\Omega_{rad}$ и $\Omega_{\Lambda}$ не являются независимыми. Из (14.7), (14.10) следует

$$\Omega_M + \Omega_{curv} + \Omega_{rad} + \Omega_{\Lambda} = 1. \qquad (18.19)$$

Обычно для интерпретации наблюдений используется «плоская ΛCDM-модель», в которой полагают $\Omega_{curv} = 0$. Предсказания ΛCDM-модели, в которой значение параметра $\Omega_{curv}$ заметно отличается от нуля, противоречат наблюдениям [19]. Считая, что $\Omega_{curv} = 0$, формулу (18.18) записывают в виде

$$\overline{r}_{\Lambda}(z) = \int_{0}^{z} \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_M (1+z')^3 + \Omega_{rad} (1+z')^4 + \Omega_{\Lambda}}}. \qquad (18.20)$$

Если согласиться с утверждением о «плоскостности» пространства и полагать $k\Omega_{curv} = 0$, а значение $\Omega_{rad}$ полагать равным $(4{,}2/h^2)\cdot 10^{-5}$, то свободными параметрами, определяющими $\overline{r}(z)$ в ΛCDM-модели, остаются $\Omega_M$ и $\Omega_{\Lambda}$, причём вследствие соотношения (18.19) независимым является лишь один из них, например, $\Omega_M$. В ΛCDM-модели чем больше значение $\Omega_M$, тем больше влияние сил притяжения и меньше влияние сил отталкивания.

Стандартная математическая процедура выбора теоретически рассчитанной зависимости $(m - M)_{\Lambda}(z)$, наилучшим образом описывающей наблюдательные данные по сверхновым типа *Ia*, показывает, что это имеет место при $\Omega_M \approx 0{,}27$, $\Omega_{\Lambda} \approx 0{,}73$, $h \approx 0{,}7$ [19; 77; 101]. Учитывая это, при расчётах обычно используют следующие значения параметров ΛCDM-модели:

$$\Omega_{curv} = 0,\ \Omega_M = 0{,}27,\ \Omega_{rad} = (4{,}2/h^2)\cdot 10^{-5},$$
$$\Omega_{\Lambda} = 1 - \Omega_M + \Omega_{rad},\ H_0 = h\cdot 100 \text{ (км/с) Мпк},\ h = 0{,}7. \qquad (18.21)$$

**Зависимость $(m - M)_S(z)$ в S-модели.** Как уже неоднократно отмечалось, при расчёте динамики Вселенной в рамках S-модели предполагают, что она не только электро-, но и гравитационно-нейтральна.

Используя (18.6), (18.17) и (17.10), формулу (18.7), определяющую расстояние $\overline{r}_S(z)$ в S-модели, запишем в виде

$$\overline{r}_S(z) = \gamma \operatorname{sh}\left[\frac{1}{\gamma} \ln(1+z)\right]. \qquad (18.22)$$

Учитывая (18.12), (18.22), получаем формулу, определяющую зависимости $(m - M)_S(z)$ в S-модели. В расчётах $(m - M)_S(z)$ используется S-модель, содержащая два независимых параметра: $\gamma$ и $h$. Использование в S-модели параметра $\gamma$ расширяет её возможности объяснения наблюдений, но делает её менее определённой. В теоретическом плане лучше, если применение модели покажет, что $\gamma = 1$.

На рис. 18.1 приведены два графика зависимости $(m - M)_S(z)$, рассчитанные по формуле (18.12) для значений $h = 0{,}65$, $\gamma = 1$ и $h = 0{,}65$, $\gamma = 1{,}35$. Для сравнения приведён также график $(m - M)_\Lambda(z)$, рассчитанный в рамках ΛCDM-модели для значений параметров (18.21).

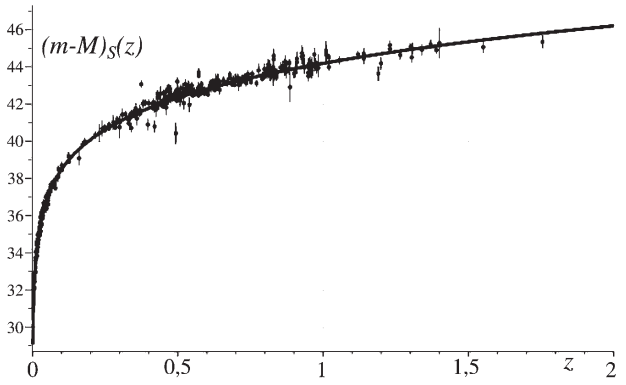



*Рис. 18.1. Зависимость $(m - M)_S(z)$ в модели равномерно расширяющейся Вселенной. Экспериментальные точки для сверхновых типа Ia взяты из [77]. Сплошная кривая получена в рамках S-модели для $h = 0$, 65, $\gamma = 1$; пунктирная кривая для $h = 0{,}65$, $\gamma = 1{,}35$; штрих-пунктирная – график $(m - M)_\Lambda(z)$, получен в рамках ΛCDM-модели для значений параметров (18.21). Все три графика практически совпадают*

Анализ графиков рис. 18.1 показывает следующее.

• Наблюдаемая зависимость $(m - M)(z)$ для сверхновых типа *Ia*, хорошо объясняется в рамках S-модели, содержащей лишь один параметр – постоянную Хаббла. Влияние параметра $\gamma$ в области $0 < z \leqslant 2$ является слабым. Его введение в теорию для этого случая не является необходимым.

• S-модель, содержащая один параметр (причём не подгоночный, а измеряемый непосредственно!), не хуже, чем ΛCDM-модель, содержащая пять параметров, значения многих из которых получены подгонкой и непосредственно не измеряются, объясняет наблюдаемую зависимость $(m - M)(z)$ для сверхновых типа *Ia*.

Впервые утверждения об определяющем влиянии, непосредственно не измеряемой тёмной энергии, на динамику Вселенной, а также об её ускоренном расширении в космологии появились именно при объяснении зависимости $(m - M)(z)$ для сверхновых типа *Ia* [97; 100].

Применение S- и ΛCDM-моделей для объяснения этой зависимости показывает явное преимущество первой из них. Возникает естественный вопрос. Зачем для объяснения этой зависимости использовать модель, содержащую пять параметров, четыре из которых чисто подгоночные, если её можно объ-

яснить в рамках модели, содержащей лишь один параметр, имеющий ясный физический смысл и измеренный непосредственно и с хорошей точностью?

Можно гипотетически предположить, что недостатки предельно простой S-модели проявятся в области красных смещений, заметно бóльших, чем имеющих место для сверхновых типа *Ia*. Чтобы убедиться, что это не так, применим S-модель для объяснения особенностей наблюдаемой анизотропии реликтового излучения, относящихся к области красных смещений $z \gtrsim 1000$.

## 18.4. Анизотропия реликтового излучения

В современной космологии считают, что фундаментальным результатом последних лет является установление факта малости пространственной кривизны Вселенной – её «плоскостности» [19; 70]. Полагают, что данные, которые убедительно подтверждают этот факт, связаны с наблюдаемой анизотропией реликтового излучения. Они были получены в результате обширных наблюдений анизотропии с помощью космических аппаратов «Реликт», COBE, WMAP и «Планк» [77; 90; 99; 104].

Изучение тонкой структуры реликтового излучения показывает, что на его равномерном фоне имеются незначительные отклонения. Наблюдаются слабые вариации температуры реликтового фона на уровне нескольких тысячных долей процента. Считается, что они являются свидетельством существования в эпоху $z \approx 1\,000$ слабых неоднородностей сжатий и разрежений в космической среде, из которых реликтовое излучение свободно доходит до нас. В сжатиях плотность и температура среды были выше средней. Они видны как яркие (относительно среднего фона) пятна. В областях разряжения плотность и температура была ниже средней, и поэтому они наблюдаются как тёмные пятна. Степень отклонения яркости пятен от средней фоновой различна. Она меняется от пятна к пятну, а также среди ярких и тёмных пятен.

В современной космологии считается, что неоднородности на реликтовом фоне – это наиболее удалённые наблюдаемые в настоящее время объекты во Вселенной. Они существовали в космической среде в эпоху рекомбинации, в то время, когда произошёл «отрыв» излучения от барионной компоненты. В эту эпоху температура излучения и барионной компоненты уменьшилась в процессе расширения Вселенной приблизительно до 3 000–3 300 К. Барионная компонента из состояния плазмы перешла в газообразное состояние, и при этом длина свободного пробега фотонов резко возросла. Она стала соизмеримой с масштабом Вселенной. Произошло «просветление» космической среды.

Наблюдаемое в настоящее время реликтовое излучение состоит из фотонов, которые свободно дошли к нам из эпохи рекомбинации. Считается, что пятна на реликтовом фоне являются изображениями в реликтовом излучении

тех неоднородностей, которые существовали в барионной компоненте космической среды в эпоху рекомбинации. Для этой эпохи красное смещение $z_{rec} \simeq 1\,000$–$1\,100$ [19; 27].

При переходе фотонов реликтового излучения из эпохи рекомбинации в современную их длины волн увеличились в $(a_0/a_{rec}) \simeq z_{rec} \simeq 1\,000$–$1\,100$ раз. При этом спектр реликтового излучения остался планковским, но его температура уменьшалась в $(a_0/a_{rec})$ раз и, как показывают измерения, в современной Вселенной стала равной 2,725 К.

Наличие неоднородностей температуры на реликтовом фоне на уровне $10^{-4}$–$10^{-5}$ от равновесного значения указывает на существование в эпоху рекомбинации в барионной компоненте также и возмущений, плотности и давления: $\delta\rho/\rho_0 \sim \delta T/T_0 \sim \delta P/P_0 \sim 10^{-4}$–$10^{-5}$.

Следуя [19], кратко изложим теорию, лежащую в основе анализа наблюдаемой угловой анизотропии температуры реликтового излучения.

«Поскольку температура реликтового излучения $T$ зависит от направления $\vec{n}$ на небесной сфере, то для излучения этой зависимости удобно использовать разложение по сферическим функциям (гармоникам) $Y_{lm}(\vec{n})$, образующим полный набор базисных функций на сфере. Под флуктуацией температуры $\delta T$ в направлении $\vec{n}$ понимают разность

$$\delta T(\vec{n}) \equiv T(\vec{n}) - T_0 - \delta T_{\text{диполь}} = \sum_{l,m} a_{l,m} Y_{lm}(\vec{n}),$$

где для коэффициентов $a_{l,m}$ выполняется соотношение $a^*_{l,m} = (-1)^m a_{l,-m}$, являющееся необходимым следствием вещественности температуры. Угловые моменты $l$ соответствуют флуктуациям с типичным угловым масштабом $\pi/l$. Существующие наблюдения позволяют изучать различные угловые масштабы от самых крупных до масштабов меньше $0{,}1°$, $l \sim 1\,000$ (рис. 18.2).

Наблюдательные данные согласуются с тем, что флуктуации температуры $\delta T(\vec{n})$ представляют собой случайное гауссово поле, то есть коэффициенты $a_{l,m}$ статистически независимы для различных $l$ и $m$:

$$\left\langle a_{l,m} a^*_{l',m'} \right\rangle = C_{l,m} \delta_{l,l'} \delta_{m,m'}, \tag{18.23}$$

где под угловыми скобками подразумевается усреднение по ансамблю вселенных, подобных нашей. Коэффициенты $C_{lm}$ в изотропной Вселенной не зависят от $m$ ($C_{lm} = C_l$) и определяют корреляцию между флуктуациями температуры в разных направлениях:

$$\left\langle \delta T(\vec{n}_1) T(\vec{n}_2) \right\rangle = \sum_l \frac{2l+l}{4\pi} C_l P_l(\cos\theta), \tag{18.24}$$

где $P_l$ – полиномы Лежандра, зависящие только от угла $\theta$ между векторами

$\vec{n}_1$ и $\vec{n}_2$. В частности, для среднеквадратичной флуктуации получаем

$$\left\langle \delta T^2 \right\rangle = \sum_l \frac{2l+l}{4\pi} C_l \approx \int \frac{l\ \ l+1}{2\pi} C_l d\ln l\,. \qquad (18.25)$$

Таким образом, величина $l(l+1)C_l/2\pi$ характеризует суммарный вклад угловых моментов одного порядка. Результаты измерения именно этой величины приведены на рис. 18.2.

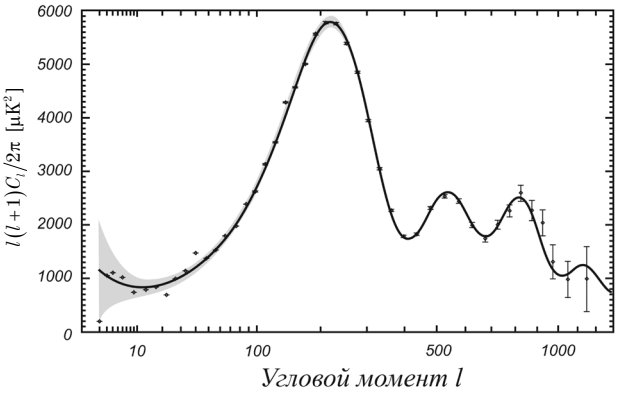



*Рис. 18.2. Результаты измерений угловой анизотропии реликтового излучения, полученные различными экспериментальными группами [90]. Теоретическая кривая получена в рамках ΛCDM-модели*

Важно отметить, что измерение угловой анизотропии реликтового излучения даёт не одно экспериментально измеренное число, а целый набор данных, то есть значения $C_l$ при различных $l$. Этот набор определяется рядом параметров ранней и современной Вселенной, поэтому его измерение даёт много космологической информации».

Особенно интересными на реликтовом фоне являются самые яркие пятна. Наблюдения чётко выделяют наличие определённого угла $\Delta\theta$ между направлениями в пространстве на их центры (см. рис. 18.2). Ещё недавно утверждалось, что этот угол с точностью 1–2 % равен одному градусу [59; 70]. Считалось, что в эпоху рекомбинации эти пятна имели приблизительно одинаковые линейные размеры.

В ΛCDM-модели, следуя теории образования структур, основанной на ОТО и идее об определяющей роли в образовании структур гравитационной (джинсовской) неустойчивости (см. классическую работу Лифшица [47], а также [18; 27; 48]), считают, что размер этих пятен определяется возрастом Вселенной в эпоху рекомбинации. Естественно предполагать, что наблюдаемые возмущения в эпоху рекомбинации указывают на то, что в эти времена во Вселенной имел место начальный этап её перехода из состояния ламинарного расширения в режим турбулентного расширения. Чётко проявляются турбулентные пульсации максимального масштаба, определяющиеся размером причинно-связанных областей в эпоху рекомбинации: $l_{max} = 2ct_{rec}$. Меньшие масштабы в эту эпоху выражены слабее. Они явно проявятся, когда амплитуда возмущений станет значительной: $\delta\rho/\rho_0 \sim \delta T/T_0 \sim \delta P/P_0 \sim 1$. Это имеет место, предположительно, при $z \gtrsim 10$ [19; 27].

В S-модели, основанной на двузнаковой гравитации, считается, что яркими пятнами на реликтовом фоне являются миры и антимиры, на которые Вселенная окончательно распалась в эпоху $z \approx 10^9$. Приближённо их можно рассматривать как однородные расширяющиеся хаббловские шары. Их размер в эпоху рекомбинации был равным $l_{max} = 2ct_{rec}$. Хаббловские шары в эпоху рекомбинации находились на начальном этапе перехода из состояния ламинарного расширения в режим турбулентного расширения.

В ΛCDM-модели считается, что размер ярких пятен, изображение которых наблюдается на реликтовом фоне, равен $l_{\max} = 2\left(c/\sqrt{3}\right)t$. Учитывается, что возмущения являются адиабатическими и максимальная скорость их распространения в эпоху рекомбинации была равна не скорости света, а скорости звука $c/\sqrt{3}$ в релятивистской среде [19; 27].

Не обсуждая деталей, отметим, в чём состоит принципиальное различие в условиях образования структур в рамках ОТО и двузнаковой гравитации. В ОТО развитие гравитационной неустойчивости в нерелятивистской компоненте космической среды изучается на «равновесном» фоне, изменение параметров которого рассчитывается в рамках ΛCDM-модели, а в двузнаковой гравитации изменение параметров этого фона рассчитывается в рамках S-модели. Согласно первой из них, ранняя Вселенная расширялась значительно быстрее, чем согласно второй. Кроме того, в S-модели существует регулярный механизм разделения частиц и античастиц, а в ΛCDM-модели он отсутствует [92; 93]. Подробно это обсуждается в гл. 25.

## 18.5. Угловые размеры удалённых объектов

Формула, определяющая угол Δθ, под которым виден объект, имеющий линейный размер $d$ и красное смещение $z$, может быть записана в виде [19. §4.7]

$$\Delta\theta = d(1+z)/r(z). \tag{18.26}$$

Здесь $r(z)$ – фотометрическое расстояние до наблюдаемого объекта. Оно определяется формулой (18.6). Измеряя длины в единицах $cH_0^{-1}$, формулу (18.26) запишем в виде

$$\Delta\theta = \bar{d}\left(1+z\right)/\bar{r}\left(z\right), \tag{18.27}$$

где $\bar{d} = d/cH_0^{-1}$, $\bar{r}\left(z\right) = r\left(z\right)/cH_0^{-1}$.

В ΛCDM-модели $\bar{r}\left(z\right)$ вычисляют по формуле (18.20). Эта модель даёт для углового расстояния между центрами ярких пятен на однородном фоне реликтового излучения, равное одному градусу, если значения параметров $\Omega_M$,

$\Omega_{rad}$, $\Omega_{curv}$, $\Omega_{\Lambda}$ и $h$ близки к приведённым в (18.21).

Время $t_{rec}$, при котором в ΛCDM-модели $\overline{a}\left(t_{rec}\right)=1/\left(1+z_{rec}\right)$ находят, решая уравнение (14.8) с граничными условиями (14.10). Расчёты показывают, что при значениях параметров (18.21)

$$t_{rec} \approx 4{,}4 \cdot 10^5 \text{ лет.} \tag{18.28}$$

В S-модели расстояние $\overline{r}\left(z\right)$ вычисляем по формуле (18.22). Момент рекомбинации $t_{rec}$ в этой модели определяется формулой

$$t_{rec} = H_0^{-1}/\left(1+z_{rec}\right). \tag{18.29}$$

В оценочных расчётах, полагая $H_0^{-1} \approx 14 \cdot 10^9$ лет, а $z_{rec} \approx 1\,000$, находим, что

$$t_{rec} \approx 14 \cdot 10^6 \text{ лет.} \tag{18.30}$$

Соотношение между угловыми и линейными размерами наблюдаемых объектов, имеющих красное смещение, зависит от того, какова геометрия трёхмерного пространства Вселенной. Согласно S-модели она является плоской, и это следствие предположений об однородности Вселенной и её гравитационной нейтральности.

Чтобы в рамках ΛCDM-модели стало возможным согласовать расчёты и наблюдения, необходимо считать, что пространство Вселенной является плоским и полагать параметр $\Omega_{curv}$ равным нулю. При значениях $\Omega_{curv}$ заметно бóльших, чем 0,02, получить согласие расчётов с наблюдениями не удаётся [19]. Введение в ΛCDM-модель требования «плоскостности» пространства не является логичным. В этой модели, фактором, определяющим динамику Вселенной, является действие неуравновешенных сил притяжения и отталкивания, обусловленных кривизной пространства-времени. Согласно ОТО, нет кривизны – нет, по крайней мере, и космологических сил притяжения. В неравномерно расширяющейся Вселенной исключить кривизну невозможно.

Размер, определяющий расстояние между центрами ярких соседних пятен на однородном фоне реликтового излучения в момент рекомбинации, в ΛCDM-модели вычисляем по формуле

$$d = \left(2/\sqrt{3}\right) c t_{rec}. \tag{18.31}$$

Учитывая (18.31), запишем (18.27) в виде

$$\Delta_{\Lambda}\theta = \frac{2t_{rec}\left(1+z_{rec}\right)}{\sqrt{3}\overline{r}\left(z_{rec}\right)H_0^{-1}}\frac{180}{\pi}. \tag{18.32}$$

В этой формуле значение угла приведено в градусах.

В ΛCDM-модели для значений параметров (18.21) и $z_{rec} = 1\,000$, получаем: $t_{rec} = 4{,}4 \cdot 10^5$ лет, $\overline{r}(z) = 3{,}3$, $\Delta_\Lambda\theta = 1{,}09$ градуса.

В S-модели $t_{rec}(1+z_{rec}) = H_0^{-1}$, $d = 2ct_{rec}$, поэтому

$$\Delta_S\theta = \frac{2 \cdot 180}{\overline{r}(z_{rec})\pi}. \qquad (18.33)$$

Учитывая (18.22), (18.33), находим, что в S-модели $\Delta\theta \approx 1^\circ$, если значение параметра γ взять равным 1,35. При этом значении параметра γ-модель равномерно расширяющейся Вселенной хорошо описывает также и наблюдаемую зависимость «видимая звёздная величина – красное смещение» для сверхновых типа *Ia* (см. рис.18.1).

Введение в S-модель второго параметра (γ) связано с желанием в рамках этой модели объяснить наличие чётко наблюдаемых «одноградусных» ярких пятен, равномерно покрывающих однородный реликтовый фон. Возможно, что это усложнение является надуманным и связано с ошибочностью используемых в расчётах предположений.

В приведённых расчётах угла Δθ имеется, на наш взгляд, слабое место. Считается, что фотоны становятся «свободными» при $z \simeq z_{rec} \simeq 1\,000$–$1\,100$, но возможно, что это не так и «просветление» барионной компоненты для реликтового излучения наступает при заметно меньших значениях $z$.

Наблюдения показывают, что около 90 % барионной компоненты в современной Вселенной содержится не в звёздах, а в межгалактических облаках горячей водород-гелиевой плазмы [18; 19]. Можно предположить, что эти облака являются гравитационно-связанными и их зародыши уже существовали в эпоху рекомбинации. В этом случае нет оснований считать, что реликтовое излучение это то, что приходит к нам из эпохи рекомбинации. Наличие в расширяющейся Вселенной областей, заполненных горячей плазмой, существенно влияло на движение фотонов в эпохи более поздние, чем эпоха рекомбинации. В реальности «просветление» Вселенной произошло не в эпоху рекомбинации, а заметно позже, например, при $z \simeq 200$–$250$. В этом случае «одноградусность» наиболее ярких пятен на реликтовом фоне легко объясняется в рамках простейшей S-модели, в которой параметр $\gamma = 1$.

## 18.6. Первичный нуклеосинтез

Из рис. 4.1 видно, что согласно S-модели, длительность интервалов времени протекания характерных процессов в ранней Вселенной на много порядков больше, чем предсказывается в рамках ΛCDM-моделей. Это может проявиться в различии предсказаний этих моделей результатов процессов, протекавших

в ранней Вселенной, которые можно наблюдать в современной Вселенной. К одному из таких результатов можно отнести предсказания S- и ΛCDM-моделей, касающиеся ядерного состава барионной компоненты после первичного нуклеосинтеза.

При рассмотрении первичного нуклеосинтеза следует иметь в виду следующее. Энергия связи ядер в расчёте на один нуклон $\leqslant$8,5 МэВ [71]. С учётом этого заключают, что в ранней Вселенной при температурах $\geqslant 10^{10}$ К ядра, состоящие из протонов и нейтронов, существовать не могли. Они были бы разрушены при столкновениях.

Такие ядра, согласно существующим представлениям, не могли существовать и при температурах $T \leqslant 10^{10}$ К. Это обусловлено тем, что они могут быть рождены в цепочках двухчастичных ядерных реакциях, на первом шаге которых возникает слабо связанное ядро дейтерия D. Его энергия связи $E_{\mathrm{D}} \simeq 1$ МэВ. Этой энергии соответствует температура $T \approx 10^{10}$ К. Скорости развала и синтеза ядер дейтерия зависят не только от температуры космической среды, но и существенно от значения параметра $\eta_B = n_B/n_\gamma$, определяющего соотношение концентраций барионов и фотонов. Если считать, как это обычно предполагается в оценочных расчётах, что $\eta_B \simeq 10^{-9}$, то скорости развала дейтерия фотонами и скорости синтеза дейтерия в более тяжёлые ядра сравниваются при температуре $T \approx 9 \cdot 10^8$ К [11; 19; 27]. Можно приближённо считать, что при $T < 9{\cdot}10^8$ К все образующиеся ядра дейтерия участвуют в реакциях образования более тяжёлых ядер, а при более высокой температуре разваливаются и не участвуют в этих реакциях. С учётом этого возможное количество дейтерия, участвующего в первичном ядерном синтезе, определяется соотношением между количеством протонов и нейтронов к моменту его начала. Согласно ΛCDM-модели температура космической среды $T \simeq 9{\cdot}10^8$ К была достигнута приблизительно через три минуты после Большого взрыва. Расчёты показывают, что при $T \simeq 9{\cdot}10^8$ К и $\eta_B \simeq 10^{-9}$ нейтрон-протонный баланс был на следующем уровне: приблизительно 13 % нейтронов и 87 % протонов.

После окончания первичного нуклеосинтеза практически все нейтроны, имевшиеся на его начало, оказались связанными в ядрах $^4$He. Через несколько минут после Большого взрыва барионная компонента состояла приблизительно на 92 % из протонов и 8 % ядер $^4$He (по массе 74 и 26 % соответственно).

Согласно расчётам первичного нуклеосинтеза в рамках ΛCDM-модели, кроме большого количества $^4$He, в очень незначительных количествах образуются ядра $^2$D, $^3$He, $^7$Li и некоторых других ядер [19; 27]. Согласно этой модели время существования в расширяющейся ранней Вселенной условий, благоприятных для синтеза ядер более тяжёлых, чем $^4$He, слишком мало, чтобы они могли в заметных количествах успеть образоваться. В современной космологии считается, что ядра, более тяжёлые, чем $^4$He, и наблюдаемые в заметных количествах во Вселенной, синтезированы не в первичном нуклеосинтезе,

а значительно позже – в звёздах. Считается, что звёзды первого поколения во Вселенной стали рождаться приблизительно через 1,5 млрд лет после Большого взрыва.

Совершенно другими являются условия протекания первичного нуклеосинтеза, если динамику расширения Вселенной описывать в рамках S-модели. Согласно этой модели первичный нуклеосинтез начался лишь через несколько лет после Большого взрыва и при температурах заметно более высоких, чем это предсказывается в рамках ΛCDM-модели. Он протекал в течение нескольких десятков лет, а вовсе не в течение нескольких минут, как это считается, а современной космологии [11; 19; 27].

Реакции нуклеосинтеза протекали при температурах $T \geqslant 10^{10}$ K. При этих температурах, согласно S-модели, существовали условия для образования нейтронов из протонов и электронов. При заметно более низких температурах ($T \leqslant 10^{9}$ K) таких условий не было. В медленно расширяющейся Вселенной свободные нейтроны уже распались и не было условий для их воспроизводства. Вследствие этого не из чего было рождать дейтерий, а следовательно, и более тяжёлые элементы.

При $T \approx 10^{10}$ K бóльшая часть образующихся ядер дейтерия разваливалась $\gamma$-квантами. В то же время S-модель предсказывает большое время существования благоприятных условий для рождения дейтерия. Можно ожидать, что за это время заметная часть дейтерия успела поучаствовать в образовании ядер $^{4}$He, а некоторая часть последних ещё и в реакциях синтеза более тяжёлых элементов.

Учитывая приведённые выше качественные соображения, можно ожидать, что предсказания результатов расчёта первичного нуклеосинтеза в рамках S- и ΛCDM-моделей будут отличаться. Чтобы провести соответствующее исследование, необходимо в программах расчёта первичного нуклеосинтеза закон изменения масштаба $a(t)$, определяемый в рамках ΛCDM-модели, заменить на закон (17.10), описывающий изменение $a(t)$ в S-модели.

У нас нет опыта проведения исследования первичного нуклеосинтеза и отлаженных программ его расчёта. Надеемся, что такие исследования в рамках S-модели будут проведены более подготовленными для этого специалистами. Этот пункт написан нами с целью привлечения их внимания к этой важной, на наш взгляд, задаче. Возможно, что, как и в исследовании динамики Вселенной, применение идей двузнаковой гравитации высветит принципиально новые моменты в первичном нуклеосинтезе.

ЧАСТЬ III

# ВАКУУМ, ЧАСТИЦЫ, АНТИЧАСТИЦЫ И ГРАВИТАЦИЯ

# ГЛАВА 19

# ГЕОМЕТРИЯ ОДНОРОДНОГО ИЗОТРОПНОГО ВАКУУМА

В этой главе найдены решения, описывающие геометрические свойства однородного изотропного Вакуума – идеализированной Вселенной, в которой отсутствуют обычные формы материи. Уравнения ОТО и двузнаковой гравитации для Вакуума совпадают. В рамках этих уравнений показано, что существует семь типов решений, описывающих эти свойства.

Интригующим следствием этих решений является вывод о возможности существования различных Вакуумов. Лишь один из них представляет пустоту с неизменными геометрическими свойствами, шесть других типов Вакуума способны к динамической эволюции. В следующей главе будет показано, что найденные решения могут быть интерпретированы как описывающие динамику Вакуума, заполненного вакуумными формами материи.

## 19.1. Уравнение для гравитационного поля в Вакууме

В этой главе рассматриваются геометрические свойства Вакуума. Предполагается, что пространство-время Вакуума является четырёхмерным однородным изотропным непрерывным римановым многообразием.

Геометрические свойства четырёхмерного пространства-времени описываются метрикой

$$ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu. \tag{19.1}$$

Метрические коэффициенты $g_{\mu\nu}$ являются функциями пространственно-временных координат $x^\alpha = (x^0, x^1, x^2, x^3)$ [11; 19; 27; 46; 50; 74]. В основе двузнаковой гравитации, как и ОТО, лежит гипотеза о взаимосвязи гравитационного поля и метрических свойств пространства-времени. Функции $g_{\mu\nu}$ дают описание этого поля.

В основополагающей работе по теории гравитации «Основы общей теории относительности» (1916 г.) [74] Эйнштейн показал, что уравнения, описывающие гравитационное поле в вакууме (областях пространства, свободных от обычных форм материи), могут быть записаны в виде

$$B_{\mu\nu} + \lambda g_{\mu\nu}B = 0, \tag{19.2}$$

где $\lambda$ – некоторая константа; $B_{\mu\nu}$ – тензор Эйнштейна, а $B$ – его след.

Тензор Эйнштейна получен свёрткой из тензора кривизны Римана $R^\rho_{\mu\sigma\tau}$

$$B_{\mu\nu} = R^{\sigma}_{\mu\sigma\nu}\,. \tag{19.3}$$

Он может быть записан в виде

$$B_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu}\,, \tag{19.4}$$

где $R_{\mu\nu}$ – тензор Риччи, а $R$ – его след [11; 19; 50; 74]. Тензор Риччи имеет вид

$$R_{\mu\nu} = \frac{\partial \Gamma^{\alpha}_{\mu\nu}}{\partial x^{\alpha}} - \frac{\partial \Gamma^{\alpha}_{\mu\alpha}}{\partial x^{\nu}} + \Gamma^{\alpha}_{\mu\nu}\Gamma^{\beta}_{\alpha\beta} - \Gamma^{\beta}_{\mu\alpha}\Gamma^{\alpha}_{\nu\beta}\,. \tag{19.5}$$

Символы Кристоффеля $\Gamma^{\alpha}_{\mu\nu}$ определяются формулой

$$\Gamma^{\alpha}_{\mu\nu} = g^{\alpha\beta}\Gamma_{\beta,\mu\nu} = \frac{1}{2} g^{\alpha\beta}\left(\frac{\partial g_{\beta\mu}}{\partial x^{\nu}} + \frac{\partial g_{\beta\nu}}{\partial x^{\mu}} - \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^{\beta}}\right). \tag{19.6}$$

Эйнштейн полагал, что с выбором уравнений гравитационного поля в виде (19.2) связан минимум произвола, поскольку, кроме $B_{\mu\nu}$, нет другого тензора 2-го ранга, который был бы составлен из метрического тензора $g_{\mu\nu}$ и его производных, не содержал бы производных более высокого порядка, чем второй, и был бы линейным относительно последних.

Эйнштейн считал [74], что уравнения (19.2) для гравитационного поля в вакууме сводятся к уравнениям

$$B_{\mu\nu} = 0. \tag{19.7}$$

В общем случае это не так. При выполнении (19.7) уравнения (19.2) выполняются автоматически. В то же время не все решения уравнений (19.2) являются решениями (19.7). В случае однородных изотропных пространств возможны два решения уравнений (19.7). Первое описывает плоское однородное трёхмерное стационарное пространство, расстояние между любыми точками которого остаётся постоянным. Второе – искривлённое открытое однородное трёхмерное пространство, радиус кривизны которого увеличивается (уменьшается) со скоростью света. Покажем, что уравнения (19.2) для Вакуума имеют и другие решения [36].

В ОТО решения, описывающие однородные изотропные пространства Вакуума, являются предельными для решений, описывающих динамику реальной Вселенной, заполненных обычной материей при стремлении её плотности к нулю. В связи с этим важно знать свойства этих предельных решений.

В двузнаковой гравитации Вакуумное приближение для описания динамики Вселенной является хорошим на космологических масштабах и при наличии обычной материи. На этих масштабах вклады частиц и античастиц в искривление пространства-времени взаимно сокращаются.

## 19.2. Уравнения Фридмана для Вакуума

Используя соотношение (19.4), находим, что след тензора Эйнштейна $B = -R$, где $R$ – след тензора Риччи. Учитывая это, из уравнений (19.2) находим

$$R(1 + 4\lambda) = 0. \tag{19.8}$$

Значение коэффициента перед параметром $\lambda$ равно четырём, и это связано с четырёхмерностью пространства-времени. Из (19.8) следует, что при всех $\lambda \neq -0{,}25$ скалярная кривизна четырёхмерного пространства-времени $R$ равна нулю и уравнения (19.2) приводятся к стандартным уравнениям Эйнштейна для вакуума

$$R_{\mu}^{\nu} = 0\,. \tag{19.9}$$

В то же время, как видно из (19.8), при $\lambda = -0{,}25$ пространство-время в вакууме может иметь скалярную кривизну $R$, отличную от нуля. Это означает, что при $\lambda = -0{,}25$ могут существовать решения уравнений (19.2), не являющиеся решениями уравнений (19.9).

Покажем, что скалярная кривизна $R$ в вакууме не может быть переменной величиной. Взяв ковариантную производную от левой и правой части уравнения (19.2) и учитывая, что

$$\nabla_{\nu}\left(R_{\mu}^{\nu} - \frac{1}{2}R\delta_{\mu}^{\nu}\right) = 0 \tag{19.10}$$

[46], находим

$$\frac{\partial R}{\partial x^{\mu}} = 0. \tag{19.11}$$

Это означает, что при $\lambda = -0{,}25$ скалярная кривизна четырёхмерного пространства-времени $R$ в вакууме хотя и может быть не равной нулю, но является постоянной величиной. В то же время отметим, что это вовсе не означает, что кривизна соответствующего трёхмерного пространства обязательно остаётся постоянной.

В случае когда скалярная кривизна $R$ отлична от нуля, используя обозначение

$$\Lambda = -\frac{1}{4}R\,, \tag{19.12}$$

уравнение (19.2), учитывая (19.4), запишем в виде

$$R_{\mu}^{\nu} - \frac{1}{2} R\delta_{\mu}^{\nu} = \Lambda\delta_{\mu}^{\nu}. \tag{19.13}$$

Это уравнение является уравнением Эйнштейна с Λ-членом для вакуума. Константа Λ называется космологической постоянной [27; 73]. Эйнштейн трактовал Λ-член как описывающий влияние неустранимой кривизны пространства-времени. В настоящее время Λ-член обычно трактуется как описывающий влияние вакуумной материи, называемой тёмной энергией (см. гл. 20).

Найдём решения уравнений (19.2) для Вакуума. Предполагаем, что в рассматриваемом случае соответствующие трёхмерные пространства являются однородными и изотропными.

Для описания геометрии однородных изотропных нестационарных трёхмерных пространств удобно исходить из геометрической аналогии, рассматривая эти пространства как однородные и изотропные трёхмерные гиперповерхности в четырёхмерном пространстве [46]. Геометрия этих трёхмерных однородных изотропных пространств определяется параметром $k$, а также масштабным фактором $a$, который часто называют радиусом кривизны.

Параметр $k$ может принимать три значения: +1; –1; 0, при которых реализуются случаи трёхмерных пространств положительной, отрицательной и нулевой кривизны соответственно. В нестационарных пространствах радиусы их кривизны $a$ изменяются во времени. Метрику четырёхмерного пространства-времени, соответствующую рассматриваемым трёхмерным пространствам, можно записать в виде

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t)\left\{d\chi^2 + f(\chi)\left(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2\right)\right\}, \tag{19.14}$$

где

$$f(\chi) = \begin{cases} \sin^2\chi & \text{при } k = +1, \\ \operatorname{sh}^2\chi & \text{при } k = -1, \\ \chi^2 & \text{при } k = 0. \end{cases} \tag{19.15}$$

Используя метрику (19.14), уравнения (19.2) стандартным образом преобразуем в космологические уравнения Фридмана:

$$3\left(\frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{kc^2}{a^2}\right) = \Lambda c^2, \tag{19.16}$$

$$2\frac{\ddot{a}}{a} + \frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{kc^2}{a^2} = \Lambda c^2. \tag{19.17}$$

Уравнения (19.16), (19.17) совместны при выполнении условия

$$\ddot{a}a - \dot{a}^2 - kc^2 = 0. \tag{19.18}$$

Формула, определяющая скалярную кривизну $R$ четырёхмерного пространства-времени через масштабный фактор $a(t)$, имеет вид

$$R = -\frac{6}{c^2 a^2}\left(kc^2 + a\ddot{a} + \dot{a}^2\right). \tag{19.19}$$

**Трансформационные свойства уравнений Фридмана.** Отметим, что уравнения Фридмана (19.16), (19.17) не меняются при преобразованиях вида $a \to -a$; $t \to -t$; $t \to t + \Delta t$, где $\Delta t$ – константа. Этот результат является прогнозируемым, поскольку в уравнение (19.14), которое определяет метрику пространства, масштабный фактор $a(t)$ входит в квадрате, а время $t$ не входит явно.

## 19.3. Плоские трёхмерные пространства

**Плоское трёхмерное стационарное пространство.** При $k = 0$ и значении параметра $\lambda = 0$ решением уравнений (19.16), (19.17), удовлетворяющим условию (19.18), является функция

$$a = a_0 = \text{const}. \tag{19.20}$$

Это решение описывает стационарное плоское трёхмерное пространство, расстояние между любыми точками которого остаётся постоянным. Скалярная кривизна $R$ четырёхмерного пространства-времени в этом случае равна нулю.

**Плоские трёхмерные инфляционные пространства.** Кроме стационарного решения (19.20), при значении параметра $\lambda = -0{,}25$ уравнения (19.16), (19.17) для плоского трёхмерного пространства имеют нестационарные решения

$$a(t) = a_0 \exp\left(\pm\frac{t}{t_0}\right), \tag{19.21}$$

где $a_0 = ct_0$, $t_0$ – свободный параметр.

Решения со знаком плюса описывают экспоненциально расширяющиеся, а со знаком минуса – сжимающиеся плоские пространства. Функции (19.21) не являются решениями стандартных уравнений Эйнштейна (19.9). Они являются решениями уравнений Эйнштейна с $\Lambda$-членом (19.13). Взаимосвязь между характерным временем $t_0$ и космологической постоянной $\Lambda$ определяется формулой

$$\Lambda = \frac{3}{c^2 t_0^2}. \tag{19.22}$$

Согласно решениям (19.21) относительные скорости сближения (разлёта) точек этих трёхмерных пространств могут быть сверхсветовыми.

**Замечание**. Обычно факт экспоненциальной расходимости масштабного фактора $a(t)$ определяется словом «инфляция» [19].

## 19.4. Искривлённые трёхмерные пространства

При значении параметра $\lambda = -0{,}25$ трёхмерные однородные пространства могут быть не только плоскими, но и искривлёнными. Параметр $k$, определяющий тип геометрии этих пространств, может принимать значения +1 и –1.

При $k = +1$ трёхмерное однородное изотропное пространство имеет конечный объём и является замкнутым. Искривлённые однородные трёхмерные пространства бесконечного объёма являются открытыми и описываются метрикой (19.14), в которой параметр $k = -1$. Найдём решения уравнений (19.16), (19.17), соответствующие случаям $k = -1$, $\lambda = -0{,}25$ и $k = +1$, $\lambda = -0{,}25$.

**Открытые трёхмерные искривлённые пространства**

**Равномерно расширяющееся (сжимающееся) открытое пространство.** При $k = -1$ условие (19.18) выполняется, если радиус кривизны

$$a(t) = |ct|. \tag{19.23}$$

Функция (19.23) описывает равномерное расширение (сжатие) однородного трёхмерного открытого искривлённого пространства со скоростью света. Она удовлетворяет уравнениям (19.16), (19.17) в случае, когда скалярная кривизна $R = 0$, а следовательно, значение космологической постоянной $\Lambda = 0$.

**Осциллирующие трёхмерные пространства.** Кроме решений (19.23), при $k = -1$ имеются и другие решения уравнений (19.16), (19.17), удовлетворяющие условию (19.18). Они описывают осциллирующие однородные трёхмерные открытые искривлённые пространства. Эти решения имеют вид

$$a(t) = a_{\max}\left|\sin\frac{t}{t_1}\right|, \tag{19.24}$$

где $a_{\max} = ct_1$, $t_1$ – свободный параметр. Имеется бесконечное множество таких решений. Они отличаются амплитудами $a_{\max}$ и периодами колебаний $T = \pi t_1$.

В случае когда радиус кривизны $a$ определяется формулой (19.24), скалярная кривизна

$$R = \frac{12}{a_{\max}^2} > 0, \tag{19.25}$$

а космологическая постоянная $\Lambda = -3/a_{\max}^2 < 0$. Решения (19.24) являются

вполне физичными. Остаётся лишь понять физический смысл Λ-члена.

**Открытые инфляционные пространства.** При $k = -1$ и $\Lambda > 0$ решения, описывающие открытые однородные пространства, имеют вид

$$a(t) = a_2 \left| \operatorname{sh} \frac{t}{t_2} \right|, \tag{19.26}$$

где $a_2 = ct_2$, $t_2$ – свободный параметр. Космологическая постоянная Λ и характерное время $t_2$ связаны соотношением

$$\Lambda = \frac{3}{c^2 t_2^2}. \tag{19.27}$$

**Особая точка решений.** Все три типа решений, описывающие открытые однородные искривлённые трёхмерные пространства, содержат точку $a = 0$. Значение $a = 0$ является допустимым в решениях уравнений Фридмана (19.16), (19.17). В то же время не совсем ясно, что происходит с пространством при $a$, обращающимся в ноль. Возможно, что в этот момент происходит уничтожение пространства и рождение нового. Полагаем, что в этом случае естественно продолжать решение далее, предполагая, что «новое» пространство продолжает эволюцию «старого».

**Замкнутые трёхмерные инфляционные пространства**

При $k = +1$ и $\lambda = -0{,}25$ уравнения (19.16), (19.17) имеют решения

$$a = a_{\min} \operatorname{ch} \frac{t}{t_3}, \tag{19.28}$$

где $a_{\min} = ct_3$, $t_3$ – свободный параметр. Область существования решений: $-\infty < t < +\infty$. Они удовлетворяют начальным условиям

$$a(0) = a_{\min}, \quad \dot{a}(0) = 0. \tag{19.29}$$

Согласно (19.28), замкнутые однородные трёхмерные пространства, рождаясь в бесконечности, сжимаются до некоторого минимального объёма, а затем, обратимым образом расширяясь, снова уходят на бесконечность. В любой момент времени $t$ объём трёхмерного пространства конечен и определяется формулой [46]

$$V = 2\pi^2 a^3(t). \tag{19.30}$$

Функция (19.28) является решением уравнений (19.16), (19.17) лишь при значении параметра $\lambda = -0{,}25$. Недостаток решений (19.28) заключается, как и в случаях (19.21) и (19.26), в их экспоненциальной расходимости, а вследствие этого в сложности физической интерпретации этих решений. Скалярная кривизна пространств, описываемых решениями (19.28),

$$R = -\frac{12}{a_{\min}^2} < 0. \qquad (19.31)$$

Соответствующее значение космологической постоянной $\Lambda = +3/a_{\min}^2 > 0$.

## 19.5. Обсуждение полученных решений

В настоящей главе показано, что ОТО и двузнаковая гравитация допускают возможность существования семи типов решений, описывающих геометрические свойства однородных изотропных трёхмерных пространств Вакуума. Они могут быть не только плоскими, но также искривлёнными, открытыми и замкнутыми. Характер эволюции этих пространств схематично изображён на рис. 19.1. Динамика этих пространств описывается следующими функциями:

1) $a(t) = a_0 = \text{const}$, $\Lambda = 0$;
2) $a(t) = a_0 \exp(t/t_0)$, $t_0 = a_0/c$, $\Lambda = 3/a_0^2 > 0$;
3) $a(t) = a_0 \exp(-t/t_0)$, $\Lambda = 3/a_0^2 > 0$;
4) $a(t) = a_{\max}|\sin(t/t_1)|$, $t_1 = a_{\max}/c$, $\Lambda = -3/a_{\max}^2 < 0$; (19.32)
5) $a(t) = |ct|$, $\Lambda = 0$;
6) $a(t) = a_2|\text{sh}\,(t/t_2)|$, $t_2 = a_2/c$, $\Lambda = 3/a_2^2 > 0$;
7) $a(t) = a_{\min}\text{ch}\,(t/t_3)$, $t_3 = a_{\min}/c$, $\Lambda = 3/a_{\min}^2 > 0$.

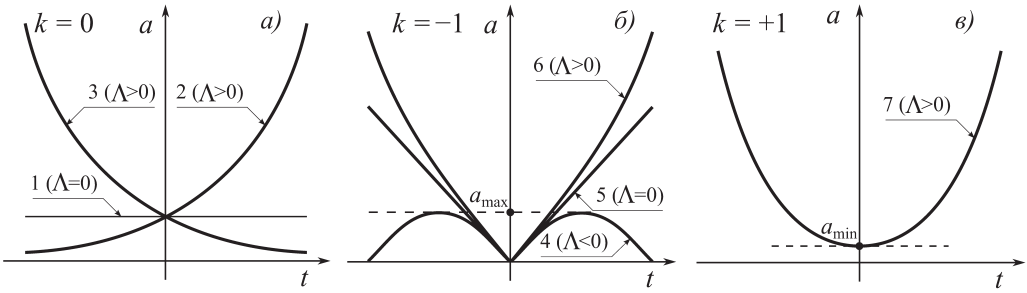



*Рис. 19.1. Графики решений (19.32), описывающих изменение масштабов трёхмерных пространств: а) плоских, k = 0; б) искривлённых открытых, k = –1; в) искривлённых замкнутых, k = +1*

Согласно двузнаковой гравитации любое из перечисленных выше решений, описывающих динамику однородных пространств Вакуума, может в принципе описывать глобальную динамику однородной изотропной Вселенной. Считаем, что физически интересными среди них являются решения 1, 4 и 5, не являющиеся инфляционными (см. рис. 19.1).

Наличие в решениях уравнений, описывающих Вакуум, сингулярностей указывает на ограниченность теории. Обычно считается, что она должна

проявляться на планковских масштабах $l_g = (G\hbar/c^3)^{1/2} \approx 1{,}6 \cdot 10^{-33}$ см, $t_g = (G\hbar/c^5)^{1/2} \approx 5{,}4 \cdot 10^{-44}$ с, где $\hbar$ – постоянная Планка [19; 27]. В общей теории относительности, не различающей частицы и античастицы, нет механизма ограничения роста гравитационных сил. Увеличение плотности энергии приводит к усилению гравитации. Чем больше концентрация энергии, тем больше напряжённость гравитационного поля, и наоборот. Это по существу и является причиной возникновения сингулярностей в ОТО.

Совершенно другая ситуация в двузнаковой гравитации. На масштабах $l \sim \hbar/mc$, $t \sim \hbar/mc^2$, значительно бóльших, чем планковские, имеет место непрерывное рождение/уничтожение виртуальных частиц/античастиц. Вследствие антитяготения между частицами и античастицами на этих масштабах включается механизм ограничения роста гравитационных полей. В двузнаковой гравитации такой механизм возможен, а в ОТО его нет. Есть основания предполагать, что в будущей квантовой двузнаковой гравитации особенности в точке $a = 0$, присутствующие в решениях 4, 5 и 6, будут отсутствовать. Следует ожидать, что эти решения в окрестности малых значений $a$ будут иметь вид

$$a(t) = \left(a_{\min}^2 + c^2 t^2\right)^{1/2}, \tag{19.33}$$

где $a_{\min}$ – масштаб, на котором с огромной скоростью происходят процессы рождения/уничтожения частиц/античастиц. Этот масштаб не связан со значением гравитационной постоянной $G$, которая в уравнениях для гравитационного поля в вакууме (см. (19.2)) не входит. По-видимому, $a_{\min} \simeq \hbar/mc \sim 10^{-12}$ см, где $m$ – масса электрона. Согласно двузнаковой гравитации, следует ожидать, что уже на этих масштабах пространство-время проявляет квантовые свойства, и его классическое описание должно быть заменено на квантовое.

В связи с обсуждаемым здесь вопросом отметим следующее. Двузнаковая гравитация является классической теорией, и в ней содержится представление о траекториях частиц и непрерывности изменения их параметров. Развитие физической теории показало ограниченность классической теории. Для описания динамики микромира должна использоваться не классическая, а квантовая теория. «Геометрическое» истолкование гравитации в микромире, очевидно, не является правильным. На это указывал и сам Эйнштейн. Он отмечал: «Защищаемое здесь истолкование Геометрии нельзя непосредственно применять к субмолекулярным (меньше, чем молекулы) пространствам... может оказаться, что такое экстраполирование столь же неправильно, как и распространение понятия температуры на частицы молекулярных размеров».

Классическую двузнаковую гравитацию применять для описания динамики космической среды на масштабах $\lesssim \hbar/mc$ нельзя. Вакуум на масштабах $\lesssim \hbar/mc$ является квантовым объектом.

Как следует из (19.32), возможно существование семи различных вакуумов. Лишь один из них представляет пустоту с неизменными геометрическими свойствами, шесть других типов Вакуума способны к динамической эволюции. Естественно возникает вопрос: что эволюционирует?

Частично ответ на этот вопрос содержится в следующей главе книги. Показано, что решения (19.32) могут быть интерпретированы не только как чисто геометрические, но и как описывающие динамику вакуума, заполненного вакуумными материями.

Физические свойства этих материй связаны с геометрическими параметрами Вакуума. Для вакуумных форм материи удаётся реализовать идею геометризации материи – представление её как искривлённости пространства-времени. Динамическую эволюцию Вакуума можно трактовать как связанную с влиянием двух вакуумных материй, для одной из которых $\Lambda = 0$, а другой – $\Lambda \neq 0$. Эту же эволюцию можно интерпретировать как обусловленную искривлённостью четырёхмерного пространства-времени (случай $\Lambda \neq 0$) либо искривлённостью трёхмерного пространства (случай $\Lambda = 0$).

Ещё сравнительно недавно считалось, что главная задача космологии – изучение влияния обычных форм материи на эволюцию Вселенной. Современное развитие космологии показывает, что определяющее влияние на динамику Вселенной оказывают не обычные, а вакуумные материи. Изучение их физико-геометрических свойств является одной из актуальных задач современной физики.

# ГЛАВА 20

# ВАКУУМНЫЕ МАТЕРИИ

## 20.1. Искривлённость пространства-времени и вакуумные материи

Уравнения общей теории относительности и двузнаковой гравитации для вакуума совпадают. В предыдущей главе рассматривались геометрические свойства безграничного однородного изотропного Вакуума. В этой главе изучаются его физические свойства. Показано, что безграничный нестационарный однородный Вакуум не бывает пустым. Он может быть заполнен двумя видами вакуумной материи. В случае если четырёхмерное пространство-время является плоским, но трёхмерное пространство искривлено, Вакуум заполнен идеальной гравитационно-нейтральной материей. Если четырёхмерное пространство-время искривлено, то, кроме гравитационно-нейтральной материи, Вакуум содержит тёмную энергию. Она описывается Λ-членом уравнений Эйнштейна. Показано, что есть основания предполагать, что однородный изотропный Вакуум является гравитационно-нейтральным и на космологических масштабах тёмная энергия не должна проявляться. В теории гравитации это означает равенство нулю космологической постоянной.

Уравнения, описывающие гравитационное поле в вакууме (областях пространства, свободных от обычных форм материи), могут быть записаны в виде [74]

$$B_{\mu\nu} + \lambda g_{\mu\nu} B = 0, \tag{20.1}$$

где $\lambda$ – некоторая константа, $B_{\mu\nu}$ – тензор Эйнштейна, а $B$ – его след.

Тензор $B_{\mu\nu}$ может быть записан в виде

$$B_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu}, \tag{20.2}$$

где $R_{\mu\nu}$ – тензор Риччи, а $R$ – его след (см. предыдущую главу).

Обычно считают (см. например, [46; 74]), что уравнения (20.1) для гравитационного поля в вакууме сводятся к уравнениям

$$B_{\mu\nu} = 0. \tag{20.3}$$

В общем случае это не так [36]. При выполнении (20.3) уравнения (20.1) выполняются автоматически. В то же время не все решения уравнений (20.1)

являются решениями (20.3). Полный набор решений уравнений (20.1) для безграничного однородного изотропного Вакуума приведён в предыдущей главе.

Эйнштейн считал, что уравнения (20.1) описывают гравитационное поле в пустых пространствах. В настоящее время полагают, что вакуум не является пустым, а заполнен вакуумной материей [19; 70]. В настоящей главе придерживаемся этой точки зрения. Покажем, что уравнения (20.1) содержат в себе описание не только геометрических свойств вакуума, но и его физических свойств. В этой главе мы будем предполагать, что вакуум является безграничным, однородным и изотропным.

В настоящее время считается, что одним из видов вакуумных материй является тёмная энергия. Предположение о её существовании, по-видимому, самая нетривиальная гипотеза современной физики. Для объяснения наблюдений в рамках ОТО, учитывающей эту гипотезу, предполагают, что современная Вселенная более чем на 70 % состоит из тёмной энергии [19; 77].

Описание влияния тёмной энергии содержится в уравнениях (20.1). Это имеет место, когда четырёхмерное пространство-время Вакуума является искривлённым и уравнение (20.1) приобретает вид уравнений Эйнштейна с Λ-членом, (19.13). Возможность описания влияния тёмной энергии на гравитацию связана с наличием в этих уравнениях Λ-члена. Она исчезает, если считать, что Λ-член равен нулю и уравнения (20.1) сводятся к уравнениям (20.3).

Влияние Λ-члена на динамику Вселенной Эйнштейн не связывал с существованием какой-то материи. Он трактовал его как описывающий влияние неустранимой кривизны пространства-времени [73]. Идея истолкования Λ-члена как описывающего некоторую необычную идеальную вакуумную материю, уравнение состояния которой $P = -\varepsilon$, возникла значительно позже [17].

В настоящей главе показано, что уравнения для гравитационного поля в Вакууме (20.1) содержат описание не только тёмной энергии, у которой уравнение состояния $P = -\varepsilon$, но и идеальной гравитационно-нейтральной материи, уравнение состояния которой

$$P = -\frac{1}{3}\rho c^2 = -\frac{1}{3}\varepsilon\,. \tag{20.4}$$

Согласно ОТО и двузнаковой гравитации (см. гл. 9), космологическое ускорение $\ddot{a}$, с которым происходит расширение однородной изотропной Вселенной, заполненной идеальной космической средой, плотность энергии которой ε, а давление $P$, определяется формулой

$$a = -\frac{4}{3}\pi G\frac{a}{c^2}\left(\varepsilon + 3P\right), \tag{20.5}$$

где $a$ – масштабный фактор Вселенной.

Из (20.5) видно, что среда, для которой уравнение состояния $P = -(1/3)\varepsilon$, является уникальной. В отличие от любых других сред она не меняет скорости расширения Вселенной, а следовательно, как мы полагаем, является гравитационно-нейтральной. Эта материя не искривляет четырёхмерное пространство-время Вселенной, но именно она определяет скорость его расширения.

Предполагая идеальность гравитационно-нейтральной материи, а также учитывая уравнение её состояния (20.4), из первого начала термодинамики

$$d(\varepsilon V) = -PdV,$$

для данной материи находим

$$\varepsilon V^{\frac{2}{3}} = \text{const}\,. \tag{20.6}$$

Так как $V \sim a^3$, то из (20.6) следует

$$\varepsilon a^2 = \text{const}. \tag{20.7}$$

## 20.2. Тёмная энергия

В гл. 19 показано, что при всех значениях параметра $\lambda \neq -0{,}25$ скалярная кривизна четырёхмерного пространства-времени $R$ равна нулю и уравнения (20.1) приводятся к виду

$$R_{\mu}^{\nu} = 0\,. \tag{20.8}$$

В то же время при $\lambda = -0{,}25$ пространство-время в Вакууме может иметь скалярную кривизну $R$, отличную от нуля. Это означает, что при $\lambda = -0{,}25$ могут существовать решения уравнений (20.1), не являющиеся решениями уравнений (20.8). Значение константы $\lambda$ связано с размерностью пространства-времени $n$ ($\lambda = -1/n$).

При $\lambda = -0{,}25$ скалярная кривизна $R$ четырёхмерного пространства-времени в Вакууме может быть не равной нулю, но при этом является постоянной скалярной величиной. В то же время отметим, что это вовсе не означает, что кривизна соответствующего трёхмерного пространства остаётся постоянной.

В случае когда скалярная кривизна $R$ отлична от нуля, используя обозначение

$$\Lambda = -\frac{1}{4}R\,, \tag{20.9}$$

уравнение (20.1) запишем в виде

$$R_{\mu}^{\nu} - \frac{1}{2} R \delta_{\mu}^{\nu} = \Lambda \delta_{\mu}^{\nu}. \tag{20.10}$$

Обычно это уравнение называют уравнением Эйнштейна с Λ-членом для гравитационного поля в Вакууме. Константа Λ называется космологической постоянной [19; 70]. Как видно из (20.9), в Вакууме эта постоянная определяется скалярной кривизной четырёхмерного пространства-времени, и поэтому Эйнштейн трактовал Λ-член как описывающий влияние неустранимой кривизны пространства-времени.

При наличии обычной материи, уравнения Эйнштейна записывают в виде [11; 19; 27; 46; 50; 74]

$$R_{\mu}^{\nu} - \frac{1}{2} R \delta_{\mu}^{\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu}^{\nu}, \tag{20.11}$$

где $T_{\mu}^{\nu}$ – тензор энергии-импульса обычной космической среды.

В теории гравитации космическую среду описывают в рамках механики сплошных сред. Если она является идеальной, то

$$T_{\mu}^{\nu} = (\varepsilon + P) u_{\mu} u^{\nu} - P \delta_{\mu}^{\nu}, \tag{20.12}$$

где $\varepsilon$ и $P$ – скаляры, плотность энергии и давление среды соответственно; $u_{\mu}$ – её четырёхмерная скорость [27; 46].

Учитывая (20.10)–(20.12), часто Λ-член в уравнениях Эйнштейна рассматривают как описывающий влияние вакуумной материи, называемой тёмной энергией [19; 70]. Считают, что эта материя является идеальной, а её термодинамические свойства определяются формулами

$$\rho_{\Lambda} = \frac{\Lambda c^2}{8\pi G}, \quad P_{\Lambda} = -\varepsilon_{\Lambda} = -\rho_{\Lambda} c^2, \tag{20.13}$$

где $\rho_{\Lambda}$ и $P_{\Lambda}$ – плотность и давление тёмной энергии. В такой интерпретации Λ-члена искривлённое четырёхмерное пространство-время никогда не бывает пустым. Оно по крайней мере заполнено тёмной энергией.

Учитывая (20.5), (20.13), заключают, что космологическое ускорение $\ddot{a}_{\Lambda}$, обусловленное тёмной энергией, определяется формулой

$$\ddot{a}_{\Lambda} = \frac{1}{3} \Lambda c^2 a. \tag{20.14}$$

Часто гипотетически и в присутствии других видов материи считают, что Λ = const, и тёмную энергию рассматривают как термодинамически независимую компоненту космической среды. При этом уравнения Эйнштейна (20.11) записывают в виде

$$R_{\mu}^{\nu} - \frac{1}{2} R\delta_{\mu}^{\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu}^{\nu} + \Lambda\delta_{\mu}^{\nu}, \qquad (20.15)$$

где $T_{\mu}^{\nu}$ – тензор энергии-импульса обычной материи [19; 27]. В ОТО, не различающей частицы и античастицы, их вклады в этот тензор суммируются. В двузнаковой гравитации частицы и античастицы отличаются знаком энергии, и поэтому их вклады в тензор энергии-импульса не суммируются, а вычитаются. Считается, что на космологических масштабах обычная космическая среда является гравитационно-нейтральной. При этом уравнение (20.15) приводится к виду (20.10).

В современной физике, чтобы согласовать теорию и наблюдения, полагают, что значение космологической постоянной $\Lambda \approx 10^{-56}$ см$^{-2}$ [19; 27; 70]. В силу малости $\Lambda$, действие тёмной энергии на размерах Солнечной системы и Галактики, где гравитационная нейтральность обычной космической среды является нарушенной, оказывается на много порядков меньшим, чем влияние локальных гравитационных полей, и поэтому не учитывается. В современной космологии считают, что влияние тёмной энергии проявляется на бóльших масштабах и без неё невозможно объяснить астрономические наблюдения, для которых важны космологические эффекты [19; 70; 77].

## 20.3. Гравитационно-нейтральная вакуумная материя

Покажем, что уравнения (20.1) для гравитационного поля в Вакууме, кроме тёмной энергии, содержат описание ещё и гравитационно-нейтральной вакуумной материи. Для этого рассмотрим в рамках уравнений (20.1) задачу о динамике Вселенной без учёта влияния на неё обычных форм материи. В двузнаковой гравитации такая идеализация является хорошим приближением при описании глобальной динамики гравитационно-нейтральной Вселенной. Она позволяет в «чистом» виде увидеть присутствие в Вакууме как тёмной энергии, так и гравитационно-нейтральной вакуумной материи.

Считаем, что трёхмерное пространство Вакуума является однородным и изотропным. Для описания геометрии этого пространства удобно исходить из геометрической аналогии, рассматривая его как однородную и изотропную трёхмерную гиперповерхность в четырёхмерном фиктивном пространстве [46]. Геометрия этой трёхмерной гиперповерхности определяется параметром $k$, а также масштабным фактором $a$, который часто называют радиусом кривизны.

Параметр $k$ может принимать три значения: +1, 0, –1, при которых реализуются случаи трёхмерных поверхностей положительной ($k = +1$), нулевой ($k = 0$) и отрицательной кривизны ($k = -1$). В нестационарных трёхмерных пространствах радиусы их кривизны $a$ меняются во времени. В сопутствующей

системе отсчёта метрику соответствующего четырёхмерного пространства-времени можно записать в виде [27; 46]

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t)\left\{d\chi^2 + f(\chi)\left(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2\right)\right\}, \qquad (20.16)$$

где

$$f(\chi) = \begin{cases} \sin^2\chi & \text{при } k = +1, \\ \operatorname{sh}^2\chi & \text{при } k = -1, \\ \chi^2 & \text{при } k = 0. \end{cases} \qquad (20.17)$$

Используя метрику (20.16), уравнения (20.10) стандартным образом [19; 27] можно преобразовать в космологические уравнения Фридмана:

$$3\left(\frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{kc^2}{a^2}\right) = \Lambda c^2 = \frac{8\pi G}{c^2}\varepsilon_\Lambda, \qquad (20.18)$$

$$2\frac{\ddot{a}}{a} + \frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{kc^2}{a^2} = \Lambda c^2 = -\frac{8\pi G}{c^2}P_\Lambda. \qquad (20.19)$$

Рассматривая левую часть этих уравнений как «геометрическую», а правую как «материальную», заключаем, что в них содержится описание некоторой материи. Как показано в п. 20.2 и как видно из уравнений (20.18), (20.19), этой материей является тёмная энергия. Её параметры определяются формулами (20.13). Следовательно, если скалярная кривизна $R$ четырёхмерного пространства-времени отлична от нуля, то Вакуум заполнен тёмной энергией.

В случае когда $R = 0$ ($\Lambda = 0$), тёмной энергии нет. Пространство является открытым, так как при $R = 0$ параметр $k$, как видно из (20.18), (20.19), не может быть равным +1.

При $R = 0$ Вакуум может быть не пустым. Чтобы это увидеть явно, уравнения (20.18), (20.19) для этого случая, запишем в виде

$$3\left(\frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{0\cdot c^2}{a^2}\right) = \frac{8\pi G}{c^2}\varepsilon_k, \qquad (20.20)$$

$$2\frac{\ddot{a}}{a} + \frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{0\cdot c^2}{a^2} = -\frac{8\pi G}{c^2}P_k, \qquad (20.21)$$

где

$$\varepsilon_k = -\frac{3c^4}{8\pi G}\cdot\frac{k}{a^2}, \quad P_k = -\frac{1}{3}\varepsilon_k \ (k = 0, -1). \qquad (20.22)$$

Из (20.20)–(20.22) видно, что при $R = 0$, $k = 0$ пространство является плоским, стационарным и пустым.

Принципиально другая ситуация при $R = 0$, $k = -1$. В этом случае уравнения (20.20), (20.21) можем трактовать как описывающие динамику плоского трёхмерного пространства, однородно заполненного вакуумной материей, термодинамические свойства которой описываются формулами

$$\varepsilon_N = \frac{3c^4}{8\pi G} \cdot \frac{1}{a^2}, \quad P_N = -\frac{1}{3}\varepsilon_N . \tag{20.23}$$

Поскольку уравнение состояния этой материи $P_N = -(1/3)\varepsilon_N$, то эта материя является гравитационно-нейтральной. Эта материя является идеальной, и её тензор энергии-импульса может быть записан в виде (20.12). Учитывая (20.23) заключаем, что параметр $\Omega_{\text{curv}}$ в ΛCDM-модели (см. гл. 14) определяет значение плотности гравитационно-нейтральной материи в современной Вселенной.

Как видно из (20.20), (20.21), динамика идеализированной Вселенной, заполненной гравитационно-нейтральной материей вида (20.23), определяется уравнением

$$a(t) = \pm ct. \tag{20.24}$$

Если слагаемые, описывающие гравитационно-нейтральную материю в плоском пространстве, из правой части уравнений Фридмана перенести в левую, то там они описывают кривизну трёхмерного пространства. При таком изменении формы записи этих уравнений материя исчезла, но появилась кривизна. Полагаем, что материя не исчезла, а кривизна трёхмерного пространства может быть истолкована как гравитационно-нейтральная вакуумная материя. Это аналогично тому, как Λ-член, согласно Эйнштейну, описывает неустранимую кривизну четырёхмерного пространства-времени, а в современной космологии он трактуется как описывающий тёмную энергию.

В заключение этого пункта выскажем следующую гипотезу. В общем случае термодинамические свойства гравитационно-нейтральной материи описываются уравнениями

$$\varepsilon V^{\frac{2}{3}} = \text{const}, \quad P = -\frac{1}{3}\varepsilon , \tag{20.25}$$

но реальное количество этой материи больше, чем это следует из уравнений (20.1). В соответствии с этим полагаем, что в случае однородной изотропной открытой Вселенной параметры гравитационно-нейтральной среды определяются формулами

$$\varepsilon_N = \frac{3c^4}{8\pi G} \cdot \frac{\gamma^2}{a^2}, \quad P_N = -\frac{1}{3}\varepsilon_N , \tag{20.26}$$

где $\gamma$ – некоторая универсальная постоянная. Её значение больше единицы.

Динамика идеализированной вселенной, заполненной гравитационно-нейтральной материей вида (20.26), определяется уравнением

$$a(t) = \pm\gamma ct. \tag{20.27}$$

Предположение о существовании «дополнительных» количеств гравитационно-нейтральной материи во Вселенной означает, что существует вклад этой материи в тензор энергии-импульса стандартных уравнений Эйнштейна (20.11), связанный не только с Вакуумом, но и с обычной гравитационно-нейтральной материей, являющейся его возбуждённым состоянием.

Отметим, что введение в S-модель дополнительного параметра $\gamma \neq 1$ связано с желанием объяснить в рамках этой модели «одноградусность» ярких пятен на реликтовом фоне. Возможно, что это желание является надуманным и объясняется неточностью наших представлений о реальных параметрах ярких пятен на реликтовом фоне. В теоретическом плане вариант S-модели с $\gamma = 1$ является предпочтительным, так как в нём нет «сверхсветовых» скоростей расширения Вселенной и он является самым простым.

## 20.4. Проблемные вопросы

В п. 20.2, 20.3 в рамках теории гравитации показано, что Вакуум может состоять из двух видов материи: тёмной энергии и гравитационно-нейтральной вакуумной материи. Они являются идеальными средами и их термодинамические свойства описываются формулами (20.13) и (20.23) соответственно. Плотность тёмной энергии определяется значением космологической постоянной $\Lambda$, а плотность гравитационно-нейтральной вакуумной материи – текущим значением радиуса кривизны $a(t)$.

Физические свойства вакуумных материй однозначно связаны с геометрией пространства-времени. Параметры тёмной энергии определяются скалярной кривизной четырёхмерного пространства-времени $R_4$ ($\Lambda = -\frac{1}{4}R_4$), а гравитационно-нейтральной вакуумной материи – кривизной трёхмерного пространства $R_3 = -\frac{3}{a^2}$.

И в общей теории относительности, и в двузнаковой гравитации пространство-время является полем, описываемым в рамках механики сплошных сред. В этих теориях описание природы микроскопических свойств вакуумных материй отсутствует. Вследствие этого пока, к сожалению, нет и убедительных ответов на ряд важных вопросов, касающихся этих материй. Рассмотрим некоторые из них.

**Вопрос 1.** Что достоверно известно о величине космологической постоянной Λ?

**Ответ.** Изучать свойства тёмной энергии непосредственно в лабораторном эксперименте или в Солнечной системе не представляется возможным, вследствие малости ожидаемых эффектов, обусловленных влиянием Λ-члена.

Оценку величины Λ получают, применяя ОТО с Λ-членом для объяснения астрономических наблюдений, для которых существенны космологические эффекты. Согласие этой теории и наблюдений удаётся достичь, если считать, что современная плотность материи во Вселенной близка к критической:

$$\rho_c = 3\frac{H_0^2}{8\pi G} \tag{20.28}$$

и при этом предполагать, что материя приблизительно на 70 % состоит из тёмной энергии [19; 70]. Учитывая, что $\rho_\Lambda \simeq 0{,}7\rho_c$, $\rho_\Lambda = c^2\Lambda/8\pi G$, а $H_0 \approx 70$ (км/с·МПк), находят

$$\Lambda \approx 2{,}1\frac{H_0^2}{c^2} \simeq 1{,}2\cdot 10^{-56}\ \text{см}^{-2}. \tag{20.29}$$

Этот результат получен в рамках космологической модели Вселенной, основанной на ОТО с Λ-членом. Эта модель, кроме космологической постоянной Λ, содержит ещё несколько плохо измеряемых параметров и является в значительной степени подгоночной. Учитывая это, вряд ли можно утверждать, что результат (20.29) является надёжным.

**Вопрос 2.** Существуют ли какие-либо убедительные соображения, в силу которых космологическую постоянную следует полагать равной нулю?

**Ответ.** В теориях негравитационных полей, при рассмотрении процессов с реальными частицами, энергия вакуума входит как аддитивная постоянная. В этих теориях производятся расчёты наблюдаемых процессов с реальными частицами, причём методика вычислений такова, что ответ не зависит от неизвестной, или неопределённой, или даже бесконечной энергии вакуума. Поэтому в теориях негравитационных полей полагать $\Lambda = 0$ можно из соображений простоты [60].

В теории гравитации наличие Λ-члена является естественным. Это слагаемое содержится в исходных уравнениях ОТО для вакуума. Считается, что применение общей теории относительности без Λ-члена для объяснения астрономических наблюдений показывает её недостаточность. Использование теории с $\Lambda \neq 0$ позволяет согласовать расчёты и наблюдения. Безусловно, ОТО с $\Lambda \neq 0$ является более сложной конструкцией, чем теория гравитации с $\Lambda = 0$. В то же время в общей теории относительности нет запретов на введение Λ-члена.

В двузнаковой гравитации введение Λ-члена нарушает основополагающую идею этой теории о гравитационной нейтральности Вселенной в целом.

В двузнаковой гравитации естественно предполагать, что Вселенная не только электронейтральна, но и гравитационно-нейтральна. Чтобы это выполнялось, необходимо считать, что $\Lambda = 0$.

**Вопрос 3.** Что означает, что свойства тёмной материи одинаковы во всех локально-инерциальных системах отсчёта?

**Ответ.** Тензор энергии-импульса тёмной энергии в сопутствующей локально-инерциальной системе отсчёта $K_0$ имеет вид

$$T_{ik} = \begin{pmatrix} \varepsilon_\Lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_\Lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_\Lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_\Lambda \end{pmatrix}. \qquad (20.30)$$

В системе $K$, движущейся относительно системы $K_0$ со скоростью $V = \beta c$ вдоль оси $OX$,

$$\varepsilon'_\Lambda = \frac{\varepsilon_\Lambda + \beta^2 P_\Lambda}{1-\beta^2}, \quad T'_{0x} = \frac{\beta\left(\varepsilon_\Lambda + P_\Lambda\right)}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad T'_{xx} = \frac{P_\Lambda + \beta^2 \varepsilon_\Lambda}{1-\beta^2} = P'_\Lambda,$$

$$T'_{yy} = T'_{zz} = P_\Lambda, \quad T'_{0y} = T'_{0z} = T'_{xy} = T'_{xz} = T'_{yz} = 0.$$

Если $P_\Lambda = -\varepsilon_\Lambda$, то $\varepsilon'_\Lambda = \varepsilon_\Lambda$, $P'_\Lambda = P_\Lambda = -\varepsilon_\Lambda$. Видно, что тензор $T'_{ik}$ является диагональным и его компоненты такие же, как и у $T_{ik}$. Это означает, что тёмная энергия не выделяет систему отсчёта. Её параметры во всех локально-инерциальных системах отсчёта одинаковы.

В теории элементарных частиц иногда в качестве аксиомы принимают определение вакуума как состояния, в котором его плотность энергии равна нулю. Формально это соответствует случаю, когда $\Lambda = 0$ и тёмная энергия исключается из рассмотрения [60. §3.1].

Предположение о $\Lambda \neq 0$ означает, что пустое искривлённое четырёхмерное пространство-время содержит гравитационное поле. Оно такое, как если бы создавалось однородно распределённым веществом с плотностью энергии $\varepsilon_\Lambda$ и давлением $P_\Lambda = -\varepsilon_\Lambda$. В этом смысле говорят о плотности энергии вакуума и его давлении.

Величины $\varepsilon_\Lambda$ и $P_\Lambda$ не проявляются ни в опытах с элементарными частицами, ни в области молекулярной и атомной физики. Единственный тип явлений, в которых, возможно, $\varepsilon_\Lambda$ и $P_\Lambda$ проявляются, – это гравитационные явления на космологических масштабах. Некоторые учёные полагают, что влияние тёмной энергии явно проявляется, уже начиная с масштабов 1,5–2 Мпк [70].

**Вопрос 4.** Не приводит ли использование в теории гравитации гравитационно-нейтральной вакуумной материи к нарушению релятивистской инвариантности этой теории?

**Ответ.** Тёмная энергия является уникальной материей. Она имеет одинаковые свойства в любых локально-инерциальных системах отсчёта. Легко показать, что гравитационно-нейтральная вакуумная материя таким свойством не обладает. В то же время нет никаких оснований считать, что все типы материй, в том числе и вакуумные, должны иметь одинаковые свойства во всех системах отсчёта. Например, реликтовое излучение таким свойством не обладает. Оно выделяет привилегированную систему отсчёта – ту, в которой излучение является изотропным. Этой системой является сопутствующая система отсчёта, используемая при записи космологических уравнений Фридмана.

Наличие в ОТО и двузнаковой гравитации таких компонент космической среды, как реликтовое излучение и гравитационно-нейтральная вакуумная материя, выделяющих систему отсчёта, не нарушает релятивистской инвариантности этих теорий. Основополагающие уравнения этих теорий записаны в ковариантной форме. Учитываемые компоненты космической среды удовлетворяют законам сохранения зарядов и энергии-импульса. В ОТО и в двузнаковой гравитации принцип независимости максимальной скорости распространения взаимодействий от выбора локально-инерциальной системы отсчёта выполняется.

**Вопрос 5.** Является ли в теории гравитации гравитационная постоянная $G$ универсальной?

**Ответ.** Для включения в теорию гравитации обычных форм материи, см. (20.11), наличие гравитационной постоянной является обязательным.

В формулы расчёта плотности энергии и давления вакуумных форм материи, см. (20.13) и (20.23), гравитационная постоянная $G$ входит. В то же время исходные уравнения для вакуума (20.1) этой постоянной не содержат. Как это понять?

Конструкции $\varepsilon_\Lambda$, $P_\Lambda$, $\varepsilon_N$, $P_N$ являются искусственно создаваемыми лишь для того, чтобы влияние кривизны можно было рассматривать как аналогичное влиянию некоторой идеальной среды. В ОТО и в двузнаковой гравитации при описании влияния на гравитационные поля вакуумных материй можно обойтись и без $\varepsilon_\Lambda$, $P_\Lambda$, $\varepsilon_N$, $P_N$ и не использовать в теории гравитационную постоянную.

Если считать, что вакуумные материи играют фундаментальную роль в гравитации, то нет оснований полагать, что гравитационная постоянная является универсальным определяющим параметром теории. Учитывая это, есть основания предполагать, что не планковские, а другие масштабы должны играть существенную роль в квантовой теории гравитации (см. п. 19.5).

**Вопрос 6.** Что можно сказать о взаимосвязи вакуума теории гравитации и физического вакуума квантовой теории?

**Ответ.** В ОТО и в двузнаковой гравитации пространство-время является полем. Эти теории являются макроскопическими. Согласно им вакуумные ма-

терии связаны с геометрическими свойствами пространства-времени. Их описание является феноменологическим. Ни ОТО, ни двузнаковая гравитация не являются квантовыми теориями. В них отсутствует описание вакуумных материй на микроскопическом уровне.

В квантовой теории вакуум не является пустотой, в нём непрерывно происходят процессы рождения/уничтожения виртуальных частиц/античастиц. Физический вакуум представляет собой низшее энергетическое состояние квантовых полей.

Родившиеся в вакууме виртуальные частицы/античастицы не могут далеко разлететься и стать реальными. Они очень быстро аннигилируют, при этом рождаются другие виртуальные частицы/античастицы. Физический вакуум является сложной квантовой системой виртуальных частиц/античастиц. Он обладает энергией, импульсом и моментом импульса.

Тензор энергии-импульса физического вакуума должен являться источником гравитационного поля. Естественно думать, что физический вакуум и вакуум теории гравитации это одно и то же. Однако реализация этой идеи в рамках ОТО показывает, что здесь существует большая проблема. Если вклады частиц и античастиц, как реальных, так и виртуальных, в тензор энергии-импульса складывать, то согласно квантовой теории значение космологической постоянной оказывается на много порядков большим, чем это следует из применения общей теории относительности для интерпретации астрономических наблюдений [26]. В связи с этим в общей теории относительности существует фундаментальная проблема: почему космологическая постоянная имеет значение, существенно меньшее, чем то, которое она, согласно квантовой теории, должна иметь?

**Вопрос 7.** Поясните суть проблемы космологической постоянной более подробно.

**Ответ.** Проблема космологической постоянной возникает в связи с попытками объяснения природы тёмной энергии ($\Lambda$-члена) как связанной с физическими свойствами вакуума квантовой теории. Ещё в 1960-е гг. советский физик Зельдович следующим образом пояснял возможную связь физических свойств вакуума и $\Lambda$-члена [Там же].

В вакууме непрерывно рождаются и уничтожаются виртуальные частицы/античастицы с массой $m$ (для простоты рассматривался лишь один их сорт). Предполагалось, что энергия массы виртуальных частиц/античастиц в формулы расчёта гравитационного поля не входит. Зельдович полагал, что лучше, если вместо энергии $mc^2$, в расчётах учитывать энергию гравитационного взаимодействия пар частица–античастица. Эту энергию он определял по формуле

$$E_G = Gm^2/l, \tag{20.31}$$

где $l = \hbar/mc$. Учитывая это, в оценочной формуле для плотности энергии вакуума им бралась величина

$$\varepsilon_G = (Gm^2/l) : l^3 = Gm^6c^4/\hbar^4. \qquad (20.32)$$

Считалось, что вакуумная материя с плотностью $\varepsilon_G$ обладает отрицательным давлением $P_G = -\varepsilon_G$. Если предположить, что она и является тёмной энергией, то, полагая $\varepsilon_G = \varepsilon_\Lambda = c^4\Lambda/8\pi G$, находим значение космологической постоянной:

$$\Lambda = 8\pi G^2m^6/\hbar^4. \qquad (20.33)$$

Если вместо $m$ подставить массу протона, то значение $\Lambda$ получится приблизительно в $10^7$ раз больше, чем это считается в современной космологии ($\Lambda \simeq 10^{-49}$ см$^{-2}$, вместо $\Lambda \simeq 10^{-56}$ см$^{-2}$). Если же вместо $m$ взять массу электрона, то значение $\Lambda$ получится приблизительно на 11 порядков меньше, чем требуется.

Огромная неопределённость получаемых оценок указывает на несовершенство, а скорее всего на ошибочность используемых предположений. В приведённой выше оценке величины $\Lambda$ многое вызывает вопросы.

Например, энергия гравитационного взаимодействия пары частица/античастица берётся со знаком плюса. В рамках ОТО частицы-античастицы гравитационно притягиваются, и правильно было бы считать, что $E_G = -Gm^2/l$. При этом для $\Lambda$ получалось бы отрицательное значение. Вместо космологических сил отталкивания имели бы место космологические силы притяжения, что совершенно не соответствует идее введения $\Lambda$-члена как источника сил отталкивания.

Если при вычислении плотности энергии вакуума использовать энергию виртуальных частиц/античастиц $mc^2$, то для $\varepsilon_\Lambda$ получается формула

$$\varepsilon_\Lambda = mc^2/l^3 = m^4c^5/\hbar^3. \qquad (20.34)$$

Соответствующее значение космологической постоянной

$$\Lambda = 8\pi Gm^4\mathrm{c}/\hbar^3. \qquad (20.35)$$

Если в эту формулу подставить массу электрона, то значение $\Lambda$ получится на 31 порядок больше, чем это предполагается в современной космологии. Если подставить массу протона, то это различие возрастает ещё на 12 порядков.

Если при расчёте плотности энергии физического вакуума использовать энергию электромагнитного взаимодействия виртуальных пар частица/

античастица, то несоответствие между расчётным значением $\Lambda$ и предполагаемым в космологии возрастёт до 130 порядков.

Приведённые оценки, по-видимому, указывают на ошибочность классической ОТО не на планковских масштабах $l_g = (G\hbar/c^3)^{1/2}$, $t_g = l_g/c$, как это обычно считается [19; 27], а на значительно бóльших. Попытки понять физический смысл величин, входящих в ОТО, и получить качественную оценку их значений, используя идеи квантовой теории, оказываются несостоятельными уже на масштабах $l \sim \hbar/mc \gg l_g$ и $t \sim \hbar/mc^2 \gg t_g$.

Несоответствие представлений ОТО и квантовой теории видим в неточности первой. Полагаем, что общая теория относительности является ограниченной теорией. В ОТО гравитация не различает частицы и античастицы, и вакуум в этой теории не является гравитационно-нейтральным, а это, по-видимому, в реальности не так.

Если предположить, что частицы и античастицы гравитационно не притягиваются, а отталкиваются, то необходимо считать, что на масштабах $l \gg \hbar/mc$, и $t \gg \hbar/mc^2$, на которых виртуальные частицы и античастицы присутствуют в равном количестве, вакуум является гравитационно-нейтральным. Это означает, что $\Lambda$-член, являющийся источником гравитационно заряженного Вакуума, согласно двузнаковой гравитации, следует полагать равным нулю. Флуктуационная составляющая вакуумного гравитационного поля отлична от нуля, но её влияние на реальные частицы значительно меньше, чем обусловленное влиянием электромагнитных флуктуаций вакуума. Влияние последних проявляется в эффектах Лэмба – Резерфорда и Казимира [13]. Вопрос о возможном влиянии флуктуаций вакуумного гравитационного поля на динамику космической среды в настоящей книге не обсуждается.

Вследствие наличия в вакууме гравитационных зарядов двух знаков может происходить его поляризация в гравитационных полях сгустков материи. Учитывая оценку Зельдовича (20.33), можно гипотетически предположить, что масштаб гравитационной поляризации вакуума

$$d \approx \hbar^2 \big/ (\sqrt{8\pi}\, G m_p^3) \simeq 10^{24}\ \text{см}. \qquad (20.36)$$

Идея о гравитационной поляризации вакуума, как альтернатива идее существования тёмной материи, рассматривается в гл. 27.

**Вопрос 8.** Не являются ли представления о вакууме, выделяющем привилегированную систему отсчёта, реализацией идеи об эфире – универсальной среде, в которой происходит движение реальных частиц/античастиц?

**Ответ.** По-видимому, вакуум действительно можно рассматривать как современное представление об эфире. При этом видно, что теоретически допустимо множество состояний такого эфира (см. гл. 19). Эти состояния определяются параметрами вакуумных материй. Одна из них – гравитационно-нейт-

ральная, как мы полагаем, в реальности и реализуется. В некотором смысле эта материя является современным релятивистским толкованием абсолютного трёхмерного ньютоновского пространства. По Ньютону, оно нематериально, евклидово и неподвижно, в реальности оно материально, псевдоевклидово и нестационарно. Движение реальных частиц/античастиц происходит в гравитационно-нейтральной вакуумной равномерно расширяющейся среде, максимальная скорость удаления точек которой в причинно-связанных областях не превышает скорости света.

Эйнштейн, рассматривая природу сил инерции, считал, что они – проявление влияния всех тел Вселенной на рассматриваемое (принцип Маха). В этом принципе содержится идея дальнодействия, которая ни в ОТО, ни в двузнаковой гравитации не присутствует. В двузнаковой гравитации естественно считать, что выполняется не принцип Маха, а другой: силы инерции обусловлены взаимодействием реальных частиц с вакуумной материей. В этой точке зрения присутствует идея о выделенной системе отсчёта, связанной с вакуумом. Вакуум – это не пустота, а электро- и гравитационно-нейтральная вакуумная материя, присутствие которой явно проявляется в её влиянии на частицы и античастицы. Оно является тем, что определяется как действие сил гравитации и инерции. Априори нет оснований считать, что действие вакуума на частицы и античастицы при одинаковых условиях является одинаковым.

Реликтовое излучение и гравитационно-нейтральная вакуумная материя, однородно заполняя Вселенную, выделяют в нём привилегированную систему отсчёта. Идея о возможности существования такой системы отсчёта обсуждалась Эйнштейном в его работе [75]. Он считал, что логически допустим эфир, выделяющий привилегированные локально-инерциальные системы отсчёта, но ему казалось, что существование такого эфира маловероятно. Он полагал, что эфир ОТО должен иметь одинаковые свойства во всех локально-инерциальных системах отсчёта. Фактически он связывал этот эфир с тёмной энергией. Возможность существования эфира, обладающего иными физическими свойствами, чем описываемого Λ-членом, Эйнштейн не предполагал.

В следующей главе книги показано, что в рамках двузнаковой гравитации естественно считать, что вакуум является электро- и гравитационно-нейтральной средой. Он, в отличие от тёмной энергии, выделяет привилегированную локально-инерциальную систему отсчёта, и это может быть установлено экспериментально.

# ГЛАВА 21

# АНИЗОТРОПИЯ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТИЦ И АНТИЧАСТИЦ

## 21.1. Исходные предположения

Предполагаем, что уравнение состояния физического вакуума таково, что он, как и реликтовое излучение, в любом месте Вселенной выделяет привилегированную локально-инерциальную систему отсчёта. Лишь в этой системе отсчёта вакуум не только однороден, но и изотропен. Вакуум нами рассматривается как главная компонента космической среды.

С учётом этого предположения и гипотезы о зависимости параметров частиц и античастиц от скорости их движения в вакууме покажем, что такие величины, как масса покоя и время жизни частиц и античастиц, которые в современной физике считаются универсальными константами во всех инерциальных системах отсчёта, в реальности таковыми не являются. Абсолютный смысл они имеют лишь в привилегированной системе отсчёта, связанной с вакуумом.

В инерциальных системах отсчёта, движущихся относительно вакуума, должна наблюдаться анизотропия параметров частиц и античастиц. Покажем, что, вследствие движения Солнечной системы в вакууме со скоростью приблизительно 390 км/с в направлении созвездия Девы, должна наблюдаться дипольная компонента анизотропии массы и времени жизни релятивистских частиц и античастиц на уровне 0,13 % от их средних значений.

Согласно двузнаковой гравитации вакуум и Вселенная в целом являются гравитационно-нейтральными. В рамках этой теории значительно проще и убедительнее, чем в ОТО, описывается наблюдаемая динамика Вселенной. Учёт антитяготения между частицами и античастицами, а также гравитационной нейтральности вакуума приводит к кардинальному изменению существующих представлений о динамике Вселенной, о барионной асимметрии окружающего нас мира, о механизме зарождения структур во Вселенной, о релятивистских стадиях эволюции космической среды и некоторых других.

В настоящей главе выскажем гипотезу, согласно которой вакуум, как и реликтовое излучение, выделяет привилегированную локально-инерциальную систему отсчёта. Покажем, что с учётом идей двузнаковой гравитации возникает необходимость в уточнении существующей интерпретации специальной теории относительности (СТО).

Найдём условие, при котором вакуум может выделять привилегированную систему отсчёта. Покажем, что наличие привилегированной системы отсчёта не противоречит основополагающим принципам специальной теории относительности.

Покажем, что если вакуум выделяет привилегированную локально-инерциальную систему отсчёта, то её наличие может быть доказано экспериментально. В локально-лоренцевых системах отсчёта, движущихся относительно вакуума, должна наблюдаться анизотропия параметров частиц и античастиц. Приведём оценку величины дипольной компоненты ожидаемой анизотропии массы частиц и времени их жизни, связанной с движением Солнечной системы относительно вакуума.

Экспериментальное доказательство существования этой анизотропии может кардинально изменить существующие представления о вакууме и его влиянии на частицы и античастицы.

Для полноты изложения кратко напомним, какими являются представления двузнаковой гравитации о составе космической среды и её распределении во Вселенной.

## 21.2. Космическая среда современной Вселенной

Согласно двузнаковой гравитации космическая среда современной Вселенной состоит из обычной и вакуумной материи. Обычная материя включает в себя две компоненты: нерелятивистскую и релятивистскую. Нерелятивистская компонента состоит из протонов, нейтронов и электронов, а также их античастиц. Релятивистская компонента включает в себя реликтовое излучение и нейтринную компоненту. Вакуумной материей является то, что составляет физический вакуум квантовой теории.

Считается, что главной компонентой космической среды является физический вакуум. Он однородно заполняет Вселенную. Частицы и античастицы являются его возбуждёнными состояниями: частицы – состояниями с положительной энергией, а античастицы – состояниями с отрицательной энергией. Вакуум и Вселенная в целом являются электро- и гравитационно-нейтральными.

Реликтовое излучение и нейтрино однородно заполняют Вселенную. В релятивистской компоненте содержится пренебрежимо малая часть энергии современной Вселенной.

Распределение барионной компоненты космической среды в наблюдаемой части Вселенной является неоднородным. Вопрос о возникновении структур в барионной компоненте космической среды в рамках двузнаковой гравитации рассмотрен в гл. 25. Показано, что возникновение структур в барионной компоненте связано с её распадом в ранней Вселенной на миры и антимиры – области, содержащие лишь барионы и антибарионы соответственно.

Миры и антимиры являются самыми крупными неоднородностями Вселенной. В процессе её расширения каждый из миров и антимиров распался

на множество более мелких фрагментов (звёзды, галактики, скопления галактик, межгалактические облака горячей плазмы и др.). Есть основание предполагать, что миры и антимиры, а также структуры, из которых они состоят, являются лишь «мелкой рябью» в однородном море электро- и гравитационно-нейтрального физического вакуума.

## 21.3. Привилегированные системы отсчёта

Рассматриваем современную Вселенную. Считаем, что она однородно заполнена реликтовым излучением и вакуумом и они являются идеальными средами.

Наличие этих однородных сред позволяет в любой части Вселенной, за исключением, возможно, лишь областей экстремальных параметров барионной компоненты, ввести привилегированные локально-инерциальные системы отсчёта $K_0$, относительно которых эти среды покоятся и не только однородны, но и изотропны. Системы отсчёта $K_0$ локально совпадают с глобальной нестационарной сопутствующей системой отсчёта, относительно которой Вселенная однородна и изотропна. Это совпадение тем лучше, чем меньше, по сравнению с текущим возрастом Вселенной, промежуток времени, для которого это совпадение рассматривается, и чем меньше линейный масштаб систем $K_0$ по сравнению с текущим масштабом Вселенной.

Тензоры энергии-импульса $T_{ik}$ реликтового излучения и вакуума в системе $K_0$ имеют вид

$$T_{ik} = \begin{pmatrix} \varepsilon & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P \end{pmatrix}. \qquad (21.1)$$

Тот факт, что у тензора энергии-импульса отличны от нуля лишь диагональные компоненты, причём их пространственные компоненты $T_{xx} = T_{yy} = T_{zz} = P$ равны по величине, означает, что в системе $K_0$ эти среды не только однородны, но и изотропны. Смысл компонент тензора $T_{ik}$: $\varepsilon$ – плотность энергии, $P$ – давление, которое в системе $K_0$ изотропно. Кроме локально-инерциальной системы отсчёта $K_0$ может быть введено бесконечное множество ещё и других локально-инерциальных систем $K$, движущихся относительно систем $K_0$ равномерно и прямолинейно. Во всех этих системах отсчёта, как и в $K_0$, реликтовое излучение и вакуум однородны. В то же время реликтовое излучение и предположительно вакуум в системах $K$ неизотропны. Степень анизотропии этих сред в системах $K$ зависит от скорости их движения $\vec{V}$ относительно системы $K_0$. Она тем больше, чем больше значение $\vec{V}$.

Анизотропия реликтового излучения в системах $K$ установлена в наблюдениях. Показано, что Солнечная система движется относительно реликтового излучения со скоростью приблизительно 390 км/с в направлении созвездия Девы. Это надёжно доказано на основании измерения дипольной компоненты анизотропии температуры реликтового излучения. Температура реликтового излучения в направлении созвездия Девы приблизительно на 0,13 % больше, а в противоположном направлении меньше, чем среднее её значение на небесной сфере [19; 59; 90].

Хотя реликтовое излучение и позволяет ввести привилегированные системы $K_0$, но связанная с этим возможность является ограниченной. От реликтового излучения можно заэкранироваться. Кроме того, в силу малости плотности реликтового излучения, его влияние на движущиеся в нём тела, как правило, является пренебрежимо малым.

Ситуация с вакуумом является принципиально другой. Он обладает огромной плотностью виртуальных частиц и античастиц, постоянно рождающихся и уничтожающихся. От него невозможно заэкранироваться и нельзя его исключить, он является квантовым объектом, неразрывно связанным с пространством-временем. Считается, что влияние вакуума на частицы и античастицы в обычных условиях проявляется, но слабо [6; 13]. Согласно двузнаковой гравитации оно явно проявляется в тех случаях, когда меняется скорость их движения в нём. Возникает реакция вакуума на эти изменения. Её проявление – это хорошо известные силы инерции (см. гл. 22). Возможно также, что влияние вакуума на гравитационные поля приводит к кардинальному изменению их свойств на галактических и бóльших масштабах (см. гл. 27). Вакуум, согласно двузнаковой гравитации, определяет динамику Вселенной в целом.

## 21.4. Относительность и привилегированные системы отсчёта

Современной релятивистской теорией, в которой рассматривается движение тел в инерциальных системах отсчёта $K$, является специальная теория относительности (СТО). В этой теории предполагается равноценность всех инерциальных систем отсчёта. Считается, что не существует привилегированной инерциальной системы отсчёта $K_0$ [46]. В то же время наличие реликтового излучения, позволяющего в подавляющей части областей Вселенной, ввести привилегированные инерциальные системы отсчёта $K_0$, указывает на ограниченность этого утверждения.

Наличие привилегированной системы $K_0$ не противоречит СТО. В самом деле, в основе СТО лежит предположение об однородности трёхмерного пространства в инерциальных системах, а также постулаты о постоянстве максимальной скорости распространения взаимодействий и одинаковости формы

записи законов природы в этих системах. Наличие среди бесконечного множества инерциальных систем отсчёта $K$ привилегированной системы $K_0$ не противоречит ни одному из основополагающих принципов СТО. Они справедливы для любой системы отсчёта $K$, в том числе и для $K_0$.

Учитывая это, полагаем, что при этом сохраняют силу преобразования Лоренца. В то же время, учитывая наличие привилегированной системы отсчёта, следует пересмотреть интерпретацию некоторых следствий этих преобразований. Ранее это иногда уже делалось. Например, при интерпретации парадокса близнецов учитывалось, что последовательный переход одного из близнецов из одной инерциальной системы отсчёта в другую с его возвращением в точку старта сопровождается не кажущимся, а реальным замедлением времени [46. § 3].

## 21.5. Анизотропия вакуума и реликтового излучения

В привилегированной системе отсчёта $K_0$ вакуум и реликтовое излучение являются не только однородными, но и изотропными. Остаются ли они изотропными в системе $K$, движущейся относительно $K_0$ со скоростью $\vec{V}$?

Будем считать, что системы координат, связанные с системами отсчёта $K_0$ и $K$, – декартовы, а скорость $\vec{V}$ направлена вдоль оси OX системы $K_0$. Считаем, что оси $OY$ и $OZ$ систем координат $K_0$ и $K$ совпадают. Учитывая преобразования Лоренца, формулы (21.1), определяющие преобразования компонент тензора энергии-импульса, при переходе от системы $K_0$ к системе $K$, движущейся относительно $K_0$ со скоростью $V = \beta c$ вдоль оси OX запишем в виде [46. §3]

$$T'_{00} = \varepsilon' = \frac{\varepsilon_\Lambda + \beta^2 P}{1-\beta^2}, \quad T'_{0x} = \frac{\beta(\varepsilon + P)}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad T'_{xx} = \frac{P + \beta^2 \varepsilon}{1-\beta^2},$$
$$T'_{yy} = T'_{zz} = P, \quad T'_{0y} = T'_{0z} = T'_{xy} = T'_{xz} = T'_{yz} = 0. \tag{21.2}$$

Отсюда следует, что для любой однородной и изотропной в системе $K_0$ идеальной компоненты космической среды, для которой уравнение состояния отлично от уравнения $P = -\varepsilon$, тензор $T'_{ik}$ не является диагональным, а для их диагональных компонент $T'_{xx} \neq T'_{yy} = T'_{zz} = P$. Это означает, что при переходе от системы $K_0$ к системе $K$ нарушается изотропия этих сред. Например, это имеет место для реликтового излучения, для которого $P = (1/3)\varepsilon$ [27; 59; 90].

Обычно считается, что вакуум является идеальной однородной средой, движение относительно которой измерить невозможно [27; 28; 70]. В этом утверждении неявно содержится предположение о том, что уравнение состояния вакуумной материи имеет вид

$$P = -\varepsilon. \tag{21.3}$$

Доказывалось ли в прямом эксперименте, что уравнение состояния для вакуума является именно таким? Полагаем, что нет, а предположение о том, что это уравнение определяется формулой (21.3), является лишь гипотезой.

Выскажем другую гипотезу: уравнение состояния физического вакуума имеет вид, отличный от определяемого формулой (21.3), и это может быть доказано на основании наблюдения анизотропии параметров частиц и античастиц в системах, движущихся относительно $K_0$. Предполагаем, что в системах $K$ должна наблюдаться дипольная компонента анизотропии массы и времени жизни частиц и античастиц.

В двузнаковой гравитации естественно предполагать, что физический вакуум квантовой теории и гравитационно-нейтральный вакуум теории гравитации – это одно и то же. Если это так, то уравнение состояния физического вакуума имеет вид

$$P = -\frac{1}{3}\varepsilon\,. \tag{21.4}$$

## 21.6. Анизотропия параметров частиц и античастиц

Предполагаем, что вакуум выделяет привилегированную систему отсчёта $K_0$. Считаем, что частицы и античастицы являются возбуждёнными состояниями вакуума и в классическом приближении значения параметров, определяющих физические свойства этих возмущений, зависят от скорости их движения в вакууме. С учётом наличия привилегированной системы $K_0$, связанной с вакуумом, следует учитывать, что такие фундаментальные величины, как масса покоя и время жизни частиц и античастиц, которые в современной физике предполагаются универсальными константами во всех локально-инерциальных системах $K$, в реальности таковыми не являются. Декларируемые их значения они имеют лишь в привилегированной системе $K_0$. Аналогичные утверждения могут быть высказаны и по поводу некоторых других физических величин. Например, если линейка движется в вакууме, то происходит реальное сокращение её длины, и оно тем больше, чем больше скорость этого движения. Если часы движутся в вакууме, то они реально замедляют свой ход, и это замедление тем значительнее, чем больше скорость этого движения. Эти эффекты, при наличии привилегированной системы отсчёта, связанной с вакуумом, следует рассматривать не как кинематические, а как динамические, обусловленные влиянием вакуума на частицы и античастицы.

Далее считаем, что частицы и античастицы являются возбуждёнными состояниями вакуума, и он выделяет привилегированную систему отсчёта $K_0$. Предполагаем, что значения параметров частиц и античастиц зависят от скорости их движения относительно вакуума. Если это так, то в системе $K$ должно

наблюдаться различие значений параметров частиц/античастиц, движущихся с одинаковой скоростью в этой системе, но с различной скоростью относительно системы $K_0$. Например, в системе $K$ должно наблюдаться различие массы и времени жизни для нейтронов, движущихся с одинаковой скоростью, но в разных направлениях. Должна наблюдаться зависимость массы частиц и времени их жизни не только от скорости их движения $\vec{u}$ в системе $K$, но и от скорости движения $\vec{V}$ этой системы относительно вакуума. Формулы, определяющие эти зависимости в системе $K$, кроме аргумента $u^2$, должны содержать ещё и аргументы $(\vec{u}\cdot\vec{V})$ и $V^2$. В этой системе должна наблюдаться анизотропия массы частиц и времени их жизни. Должна наблюдаться зависимость этих параметров от направления движения частицы по отношению к направлению скорости $\vec{V}$.

Согласно излагаемой здесь точке зрения, находясь в «закрытой» локально-инерциальной системе $K$ и имея необходимое экспериментальное оборудование для измерения параметров частиц, можно установить, с какой скоростью и в каком направлении эта система движется в вакууме.

Рассмотрим это более подробно. Пусть $K_0$ – система отсчёта, в которой вакуум покоится, а система $K$ движется относительно $K_0$ со скоростью $\vec{V}$; $\vec{u}$ – скорость движения частицы относительно системы $K$, а $\vec{w}$ – скорость этой же частицы, но относительно системы $K_0$.

Для простоты считаем, что скорость $\vec{V}$ направлена вдоль оси OX системы $K_0$, связанной с вакуумом. Считается, что оси $OY$ и $OZ$ систем $K_0$ и $K$ совпадают. Учитывая закон сложения скоростей в СТО, находим зависимость $\vec{w}$ от $\vec{u}$ и $\vec{V}$. Она имеет вид [46. § 5]

$$w_x = \frac{u_x + V}{1 + \dfrac{\vec{u}\cdot\vec{V}}{c^2}}, \quad w_y = \frac{u_y\sqrt{1-\dfrac{V^2}{c^2}}}{1 + \dfrac{\vec{u}\cdot\vec{V}}{c^2}}, \quad w_z = \frac{u_z\sqrt{1-\dfrac{V^2}{c^2}}}{1 + \dfrac{\vec{u}\cdot\vec{V}}{c^2}}. \tag{21.5}$$

В СТО нет привилегированной системы отсчёта $K_0$. Формально это означает, что скорость $\vec{V}$ полагается равной нулю. При этом $\vec{w} = \vec{u}$ и формулы, определяющие зависимость массы $m$ и времени жизни $\tau$ в системе, имеют вид

$$m(u^2) = m_0 \cdot \gamma(u^2),\ \tau(u^2) = \tau_0 \cdot \gamma(u^2), \tag{21.6}$$

где $m_0$ и $\tau_0$ значения $m$ и $\tau$ при $u = 0$; $\gamma = (1 - u^2/c^2)^{-1/2}$ – фактор Лоренца.

Если идея о привилегированной системе отсчёта $K_0$, связанной с вакуумом, является правильной, а значения параметров частиц и античастиц определяются скоростью их движения в вакууме, то в реальности в системе $K$ должны наблюдаться не значения $m(u^2)$ и $\tau(u^2)$, а $m(w^2)$ и $\tau(w^2)$. Учитывая формулы (21.5) и (21.6), запишем $m(w^2)$ и $\tau(w^2)$ в виде

$$m\left(\vec{u},\vec{V}\right)=m_0\left(1+\frac{\vec{u}\cdot\vec{V}}{c^2}\right)/\Theta,\quad \tau\left(\vec{u},\vec{V}\right)=\tau_0\left(1+\frac{\vec{u}\cdot\vec{V}}{c^2}\right)/\Theta, \qquad (21.7)$$

где

$$\Theta=\left(1-\frac{u^2}{c^2}-\frac{V^2}{c^2}+\frac{u^2V^2}{c^4}\right)^{1/2}. \qquad (21.8)$$

Из этих формул видно, что масса покоя и время жизни частиц и античастиц в системах отсчёта $K$, движущихся относительно $K_0$ с различной скоростью, отличаются. Кроме того, в системах $K$ должна наблюдаться анизотропия массы и времени жизни частиц и античастиц. Величины этих параметров зависят не только от $u^2$ и $V^2$, но и от $(\vec{u}\cdot\vec{V})$.

Приведём оценку величины ожидаемого эффекта. Для простоты будем считать, что $u_y=u_z=0$. В этом случае при одном и том же значении $u$ возможны два значения для скорости $\vec{w}$

$$w_1=\frac{V+u}{1+\frac{uV}{c^2}},\quad w_2=\frac{V-u}{1-\frac{uV}{c^2}}. \qquad (21.9)$$

Скорость $w_1$ соответствует случаю, когда частица движется вдоль $\vec{V}$, а скорость $w_2$ имеет место, когда $\vec{u}$ и $\vec{V}$ антипараллельны.

В этих двух предельных случаях экспериментально измеряемые массы частиц и времена их жизни, зависящие, как мы полагаем, от скорости движения частицы относительно вакуума, должны иметь значения:

– в первом случае:

$$m\left(w_1^2\right)=m_0\cdot\gamma\left(w_1^2\right),\quad \tau\left(w_1^2\right)=\tau_0\cdot\gamma\left(w_1^2\right); \qquad (21.10)$$

– во втором случае:

$$m\left(w_2^2\right)=m_0\cdot\gamma\left(w_2^2\right),\quad \tau\left(w_2^2\right)=\tau_0\cdot\gamma\left(w_2^2\right). \qquad (21.11)$$

Если наблюдения выявят различия этих случаев, то это будет веским аргументом в пользу правильности гипотезы о существовании привилегированной системы отсчёта, связанной с вакуумом, и его влиянии на параметры частиц и античастиц.

Естественно думать, что привилегированные системы отсчёта, связанные с реликтовым излучением и вакуумом, совпадают. Учитывая это, полагаем, что лаборатории, в которых изучаются зависимости $m(\vec{u},\vec{V})$ и $\tau(\vec{u},\vec{V})$, движутся со скоростями приблизительно 390 км/с в направлении созвездия Девы.

Как видно из (21.7)–(21.11), эффект анизотропии наиболее ярко должен проявляться для релятивистских частиц, у которых скорость $u \approx c$. Для них

$$\frac{\Delta m}{\overline{m}} = \frac{\Delta\tau}{\overline{\tau}} \approx 2\frac{V}{c}, \tag{21.12}$$

где $\Delta m = m\left(w_1^2\right) - m\left(w_2^2\right)$, $\Delta\tau = \tau\left(w_1^2\right) - \tau\left(w_2^2\right)$, $\overline{m} = m_0/\Theta$, $\overline{\tau} = \tau_0/\Theta$.

Подставляя в (21.12) $V = 390$ км/с, находим ожидаемое значение дипольной компоненты анизотропии массы и времени жизни релятивистских частиц/античастиц, обусловленное движением Солнечной системы в вакууме:

$$\frac{\Delta m}{2\overline{m}} = \frac{\Delta\tau}{2\overline{\tau}} \approx 1{,}3 \cdot 10^{-3} = 0{,}13\,\%. \tag{21.13}$$

Релятивистские поправки столь малой величины могут быть измерены, но для этого необходимы специальные исследования.

Дипольная компонента анизотропии температуры $T$ реликтового излучения надёжно установлена $\Delta T/2T \simeq 0{,}13\,\%$ (Нобелевская премия по физике 2006 г.).

Экспериментальное доказательство анизотропии параметров массивных частиц и античастиц является одной из важнейших задач современной физики. Пока явно в наблюдениях анизотропия параметров частиц и античастиц не проявлялась. Полагаем, что это связано с её малостью в условиях реальных экспериментов. Вследствие этого не наблюдалось также и отличие в измеренных значениях массы покоя и времени жизни частиц и античастиц в различных лабораториях.

Отличие параметров частиц/античастиц в различных инерциальных системах отсчёта, а также и их анизотропия должны быть бóльшими в системах отсчёта, движущихся в вакууме со скоростями, соизмеримыми со скоростью света. Например, если

$$V = \frac{1}{2}c,\ u = \frac{1}{2}c,\ \text{то}\ \ w_1 = \frac{4}{5}c,\ w_2 = 0.$$

При этом

$$\frac{\Delta m}{2m} = \frac{\Delta\tau}{2\tau} \approx 0{,}5.$$

В следующей главе покажем, что в явном виде влияние вакуума на частицы и античастицы проявляется в тех случаях, когда меняется скорость их движения в нём. Возникает реакция вакуума на это изменение. Она проявляется в виде действия на частицы и античастицы сил инерции. Именно в этом и состоит, как мы полагаем, природа этих сил.

# ГЛАВА 22

# О ПРИРОДЕ СИЛ ИНЕРЦИИ

## 22.1. Основополагающая идея

В ОТО, как и в ньютоновской механике, считается, что причиной сил инерции является неинерциальность используемых систем отсчёта. В то же время в этих теориях неинерциальным системам отсчёта не приписываются какие-либо физические свойства, которые можно трактовать как материальные источники сил инерции.

В основе ОТО лежит предположение об эквивалентности сил инерции и гравитации. Это предположение является сомнительным, если учитывать следующее. Источником реальной гравитации является материя, и она не может быть ни рождена, ни исключена никаким выбором системы отсчёта. В то же время в ОТО силы инерции могут быть рождены за счёт перехода из инерциальной системы отсчёта в неинерциальную, а затем уничтожены обратным переходом в инерциальную систему отсчёта. Рассматривать инерцию и гравитацию как эквивалентные понятия нелогично, если считать, что их источниками не является одна и та же причина.

В двузнаковой гравитации природу сил инерции и гравитации естественно связывать с взаимодействием частиц и античастиц с физическим вакуумом, обладающим не только геометрическими, но и физическими свойствами. В этой теории считается, что главной и универсальной компонентой космической среды является физический вакуум квантовой теории. Он однородно заполняет Вселенную и является электро- и гравитационно-нейтральным. Частицы и античастицы являются его возбуждёнными состояниями. Частицы – состояниями с положительной энергией, а античастицы – состояниями с отрицательной. Значения их параметров зависят от скорости их движения в вакууме (см. гл. 16 и 21).

В любом месте Вселенной гравитационно-нейтральный вакуум выделяет привилегированную локально-инерциальную систему отсчёта. В этой системе свободные частицы/античастицы движутся равномерно и прямолинейно. Пространство-время в этих системах является псевдоевклидовым, а трёхмерное пространство – плоским. В тех случаях, когда меняется скорость или направление движения частиц и античастиц в вакууме, возникает его реакция на эти изменения. Она проявляется как действие со стороны вакуума на частицы и античастицы сил инерции. Именно в этом и состоит, как мы предполагаем, природа этих сил. Априори нет оснований считать, что действие вакуума на частицы и античастицы, при одинаковых условиях, является одинаковым.

Исследование природы сил инерции начнём с анализа представлений Эйнштейна об этих силах в период создания им ОТО.

## 22.2. Эйнштейн о природе сил инерции

Интересующая нас эйнштейновская точка зрения на природу сил инерции содержится в его основополагающей работе по общей теории относительности [74]. Приведём выдержку из этой работы, поясняющую представления Эйнштейна о природе этих сил в период разработки им ОТО.

«В классической механике и в неменьшей степени в специальной теории относительности присутствует некоторый теоретико-познавательный недостаток, который, пожалуй, впервые был ясно отмечен Э. Махом. Мы поясним его на следующем примере. Пусть два жидких тела одинаковой величины и состава свободно парят в пространстве на таком большом расстоянии друг от друга (и от всех прочих масс), что должны приниматься во внимание только те гравитационные силы, с которыми действуют друг на друга части одного и того же тела. Пусть расстояние между этими телами остаётся неизменным. Пусть также не происходит перемещения одной части относительно другой части одного и того же тела. Но пусть каждая масса, рассматриваемая наблюдателем, покоящимся относительно другой массы, вращается вокруг линии, соединяющей массы, с постоянной угловой скоростью (это относительное движение обеих масс всегда можно установить). Теперь представим себе, что поверхности обоих тел ($S_1$ и $S_2$) измерены с помощью масштабов (покоящихся относительно этих тел); пусть в результате измерения оказалось, что поверхность $S_1$ представляет собой сферу, а поверхность $S_1$ – эллипсоид вращения.

Теперь возникает вопрос: “По какой причине тела $S_1$ и $S_2$ ведут себя по-разному?” Ответ на этот вопрос может быть только тогда признан удовлетворительным[1] с теоретико-познавательной точки зрения, когда обстоятельство, указанное в качестве причины, является наблюдаемым опытным фактом; ибо принцип причинности только тогда имеет смысл суждения о явлениях в мире опыта, когда в качестве причин и следствий в конечном итоге оказываются лишь наблюдаемые факты.

Механика Ньютона не даёт удовлетворительного ответа на этот вопрос. Она говорит следующее. Законы механики справедливы для пространства $R_1$, относительно которого тело $S_1$ находится в покое, но несправедливы для пространства $R_2$, относительно которого находится в покое тело $S_2$. Однако галилеево пространство $R_1$ (и движение по отношению к нему), которое при этом

[1] Удовлетворительный с теоретико-познавательной точки зрения ответ может, конечно, ещё оказаться физически неверным в том случае, когда он не согласуется с другими опытными данными.

вводится, является фиктивной причиной, а не наблюдаемым фактом. Таким образом, ясно, что механика Ньютона в рассматриваемом случае удовлетворяет требованию причинности не по существу, но лишь кажущимся образом, возлагая ответственность за наблюдаемое различное поведение тел $S_1$ и $S_2$ на фиктивную причину – пространство $R_1$.

Удовлетворительным ответом на поставленный выше вопрос может быть только следующий: физическая система, состоящая из тел $S_1$ и $S_2$, сама по себе не даёт возможности указать причину, с помощью которой можно было бы объяснить различное поведение тел $S_1$ и $S_2$. Причина должна, следовательно, лежать вне этой системы. Отсюда следует вывод, что общие законы движения, которые, в частности, определяют форму тел $S_1$ и $S_2$, должны быть таковы, чтобы механические свойства тел $S_1$ и $S_2$ в значительной степени обусловливались отдалёнными массами, которые мы не включили в рассматриваемую систему. Эти отдалённые массы (и их относительные движения по отношению к рассматриваемым телам) должны тогда рассматриваться как носители принципиально наблюдаемых причин различного поведения рассматриваемых тел $S_1$ и $S_2$; они становятся на место фиктивной причины $R_1$».

## 22.3. Материальная природа сил инерции

В общей теории относительности утверждается, что переходом в неинерциальные системы отсчёта можно искусственно создать гравитационные поля. Считается, что такие поля, вообще говоря, отличаются от тех полей, источником которых является материя. Первые из них могут быть уничтожены переходом в инерциальную систему отсчёта, тогда как для вторых это невозможно [46]. Вследствие присутствия такого различия в поведении этих полей часто о гравитационных полях, связанных с неинерциальностью систем отсчёта, говорят как о фиктивных, а о порождаемых материей – как о реальных. В существовании различия в поведении этих типов гравитационных полей видится некоторый теоретико-познавательный недостаток ОТО. Полагаем, что он связан с ошибочностью интерпретации природы сил инерции – понимаемых как искусственно порождаемых неинерциальностью системы отсчёта, а не связанных с взаимодействием тел, как это имеет место для «реальных» гравитационных полей.

Как следует из приведённой в п. 22.2 выдержки из работы Эйнштейна [74], он предполагал, что наличие сил инерции связано с влиянием на любое тело всех отдалённых масс Вселенной. Эту идею в литературе определяют как принцип Маха. После создания ОТО и её подробного анализа, было показано, что принцип Маха в ОТО не содержится [27]. Этот принцип не является удовлетворительным по следующей причине. Силы инерции, действующие

внутри некоторой системы, могут быть изменены за счёт внутренних процессов. Например, вращающееся тело $S_2$ можно заставить вращаться быстрее или медленнее. При этом в соответствии с происходящими изменениями параметров вращения будут меняться и силы инерции, действующие на отдельные элементы тела $S_2$. Очевидно, что эти изменения сил инерции, если оставаться на позиции о конечности максимальной скорости распространения взаимодействий не могут быть связаны с «отдалёнными массами», как это утверждается в принципе Маха. В нём в неявной форме содержится идея о «дальнодействующей» природе этих сил, что по сути противоречит полевому «близкодействующему» описанию полей в ОТО.

Кроме того, переходя в инерциальную систему отсчёта, связанную с телом $S_1$, вы не можете утверждать, что исключили силы инерции, действующие на элементы тела $S_2$. При таком переходе тело $S_2$ не станет сферически симметричным. Чтобы объяснить этот факт, необходимо считать, что гравитационные поля в окрестности масс $S_1$ и $S_2$ реально являются различными, и это различие не зависит от того, в какой системе отсчёта вы находитесь: в системе $S_1$ или $S_2$.

В чём видим неточность рассуждений Эйнштейна, описанных в приведённой выдержке из его работы [74]? Эйнштейн был прав, когда утверждал, что физическая система, состоящая из тел $S_1$ и $S_2$, сама по себе не даёт возможности указать причину, с помощью которой можно было бы объяснить различие в их поведении. В то же время с ним трудно согласиться, когда он утверждал, следуя Маху, что причина, приводящая к различию поведения тел $S_1$ и $S_2$, лежит вне этой системы и обусловлена отдалёнными массами, которые мы не включили в рассматриваемую систему.

В двузнаковой гравитации отличие в поведении тел $S_1$ и $S_2$ естественно связывать не с удалёнными телами, а с тем, во что погружены тела $S_1$ и $S_2$. В самом деле, согласно этой теории тела находятся не в пустоте, а в вакууме, который сам является средой, обладающей определёнными физическими свойствами. Вакуум влияет на всё, что в него погружено. При этом это взаимодействие определяется тем, в каком состоянии относительного движения по отношению к нему находятся погруженные в него тела $S_1$ и $S_2$. В такой трактовке силы инерции это не фикция, а то, что связано с реальным взаимодействием тел с вакуумной материей, которая в двузнаковой гравитации является гравитационно-нейтральной.

В двузнаковой гравитации гравитационно-нейтральный вакуум является, по существу, материализованным абсолютным ньютоновским пространством, но описываемым в рамках релятивистской теории. Такой вакуум является выделенным материальным телом отсчёта – однородным изотропным равномерно расширяющимся во времени. Тела, являющиеся возмущёнными состояниями вакуума и движущиеся относительно вакуума неравномерно или непря-

молинейно, испытывают с его стороны реакцию на изменение состояния их движения. Эта реакция и является тем, что определяется как силы инерции. Действие этих сил невозможно исключить переходом в инерциальные системы отсчёта. Они столь же реальны, как и «истинные» гравитационные силы.

В двузнаковой гравитации и гравитационные, и инерционные поля обусловлены искривлённостью (деформацией) вакуума-пространства-времени. Инерционные поля, действующие на тело, связаны с той частью деформации вакуума, которая вызвана изменениями скорости движения в нём этого тела.

Согласно двузнаковой гравитации вакуум различает частицы и античастицы и его влияние на них не является одинаковым. Вследствие этого в этой теории считается, что не только влияние гравитации, но и инерции на вещество и антивещество, при одинаковых условиях, например, в мысленных экспериментах Эйнштейна в лифте, не является одинаковым. Рассмотрим это утверждение подробнее.

## 22.4. Принцип эквивалентности гравитации и инерции

Одним из возражений против идеи о различии в гравитации частиц и античастиц является, как утверждают наши оппоненты, её противоречие принципу эквивалентности. Согласно этому принципу невозможно различить силы инерции и силы гравитации, поскольку это одно и то же, но рассматриваемое с разных точек зрения. Считается, что силы инерции, действующие на частицы и античастицы, при одинаковых условиях, равны, поэтому, учитывая принцип эквивалентности, следует считать, что равны и силы гравитации, действующие на них.

Этот эвристический принцип использован Эйнштейном при создании общей теории относительности. Один из вариантов его формулировки: «Силы гравитационного взаимодействия пропорциональны гравитационным массам тел, а силы инерции пропорциональны их инертным массам. Инертная и гравитационная массы равны, поэтому невозможно отличить, какая сила действует на данное достаточно малое тело – гравитационная или сила инерции. Одно и то же качество тела проявляется либо как «инерция», либо как «тяготение». Равенство тяжёлой и инертной масс для макроскопических тел, состоящих из вещества и имеющих различные физические параметры, проверено с высокой степенью точности [10; 102].

Для пояснения принципа эквивалентности Эйнштейн рассматривал два следующих мысленных эксперимента. В первом из них тела находятся в лифте, который бесконечно удалён от гравитирующих тел и двигается поступательно с ускорением $\vec{a}_0$. Тогда на все тела, находящиеся в лифте, действует сила инерции $\vec{F}_i = -m\vec{a}_0$. Тела, связанные с лифтом, вследствие действия этих сил

давят на опору или растягивают подвес. Во втором эксперименте лифт висит в однородном гравитационном поле. При этом все тела в нём обладают весом, давят на опоры или растягивают подвес. Эйнштейн полагает, что, находясь в этом лифте, невозможно отличить эти два случая. Он считал, что все механические явления в обоих случаях происходят одинаково. Это предположение Эйнштейн обобщил на все физические явления.

Несмотря на кажущуюся очевидность выводов, следующих из мысленных экспериментов Эйнштейна, полагаем, что в них содержится неявное предположение, правильность которого сомнительна. Оно касается поведения антивещества в этих экспериментах. Эйнштейн неявно предполагал, что истинное гравитационное поле не различает вещество и антивещество. Является ли это предположение правильным или, возможно, верным является обратное ему, а именно, что гравитация различает частицы и античастицы? Рассмотрим подробно эти варианты в рамках мысленных экспериментов Эйнштейна.

Отметим, что в мысленных экспериментах Эйнштейн рассматривал случаи, когда тела жёстко связаны с лифтом (давят на опоры или растягивают подвес).

## 22.5. Мысленные эксперименты Эйнштейна в лифте

Рассмотрим мысленные эксперименты Эйнштейна, в которых *лифт всегда состоит из вещества*, а человек внутри него может состоять из вещества (человек – Ч) или из антивещества (античеловек – А).

**Человек в лифте**

**Эксперимент № 1**. Лифт, состоящий из вещества, неподвижно висит на тросе в поле тяжести. На полу лифта стоит человек, также состоящий из вещества. Со стороны гравитационного поля на человека действует сила тяжести $\vec{F}_g$, которая уравновешивается силами реакции опоры $\vec{F}_o$ со стороны лифта на человека (рис. 22.1).

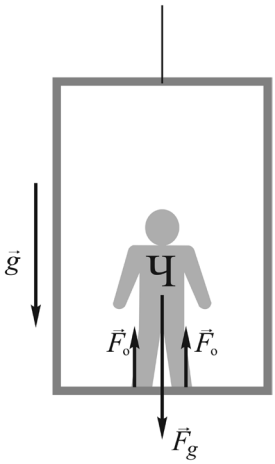



*Рис. 22.1. Человек в неподвижном лифте в поле тяжести*

**Эксперимент № 2**. Лифт, состоящий из вещества, ускоренно движется, поле тяжести отсутствует. На полу лифта стоит человек, также состоящий из вещества. Со стороны лифта на человека действуют силы реакции опоры $\vec{F}_o$, которые уравновешиваются силой инерции $\vec{F}_i$ (рис. 22.2).

Принцип эквивалентности гласит, что с точки зрения находящегося внутри лифта человека оба эти случая являются эквивалентными.

Для того чтобы провести подобный мысленный эксперимент с античеловеком в лифте, сначала качественно

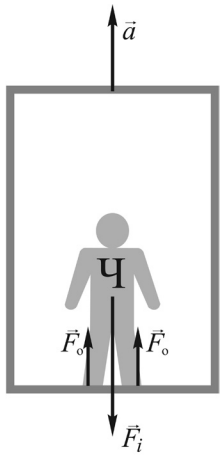



*Рис. 22.2. Человек в ускоряющемся лифте в отсутствие поля тяжести*

рассмотрим, как возникают силы реакции опоры, и их возможную необычность в случае, если одно из контактирующих тел состоит из антивещества, а второе из вещества.

**Силы реакции опоры.** Происхождение силы реакции опоры качественно может быть пояснено следующим образом. При соприкосновении двух твёрдых тел более лёгкие и подвижные электроны в атомах отталкиваются друг от друга, а тяжёлые ядра можно считать остающимися на своих местах. При этом электрически нейтральные атомы становятся диполями, обращёнными друг к другу зарядами одного знака. Вследствие этого между двумя телами, состоящими из вещества, при их сжатии возникает сила отталкивания (рис. 22.3). Чем большую силу прикладывают, чтобы прижать два тела друг к другу, тем больший дипольный момент получают атомы поверхностных слоев и тем больше сила отталкивания между телами.

Если рассматривать аналогичную ситуацию, но при контакте двух твёрдых тел, одно из которых состоит из вещества, а второе из антивещества (рис. 22.4), то следует учитывать, что в веществе «подвижными» являются электроны, а в антивеществе позитроны. Вследствие этого атомы/антиатомы при сближении вещества и антивещества становятся диполями с обращенными друг к другу электрическими зарядами противоположных знаков[1]. Вследствие

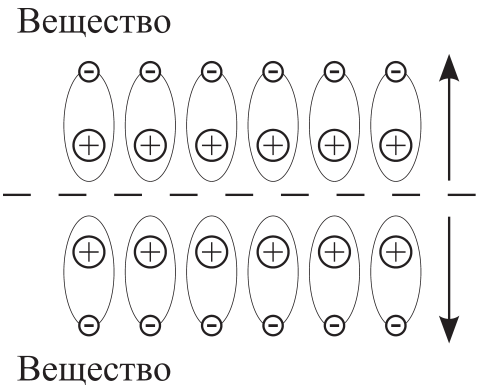



*Рис. 22.3. Качественное пояснение происхождения сил реакции опоры при контакте вещество-вещество*

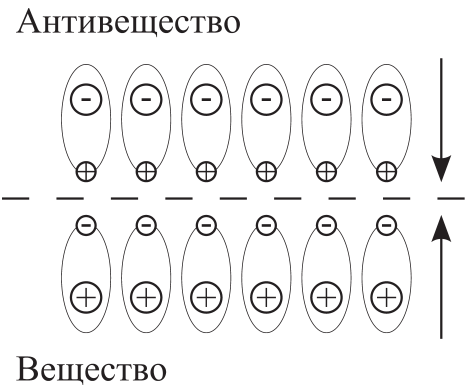



*Рис. 22.4. Качественное пояснение происхождения сил реакции опоры при контакте вещество-антивещество*

[1] Реакции аннигиляции между веществом и антивеществом не рассматриваем. Предполагаем, что они не имеют отношения к гравитации и принципу эквивалентности. Это предположение в духе мысленных экспериментов Эйнштейна!

этого, при соприкосновении этих тел, их реакция будет не препятствовать их сжатию, а наоборот, стремиться увеличивать его.

Качественные соображения, приведённые выше, показывают, что то, что в мысленных экспериментах Эйнштейна рассматривается как реакция опоры и считается очевидным понятием, в случаях соприкосновения вещества и антивещества таковым вовсе не является.

**Античеловек в лифте**

**Эксперимент № 3.** Лифт, состоящий из вещества, неподвижно висит на тросе в поле тяжести. На полу лифта стоит античеловек (А). Со стороны гравитационного поля на античеловека действует сила тяжести $\vec{F}_g$, а также силы реакции опоры $\vec{F}_o$ со стороны лифта (рис. 22.5). Но в отличие от эксперимента № 1 реакция опоры будет направлена в противоположном направлении. Означает ли это, что и сила тяжести, действующая на античеловека, должна быть направленной в обратном направлении? Вовсе не обязательно. Возможно, что, как и в эксперименте № 1, она действует «вниз». До тех пор пока соответствующий реальный эксперимент не будет проведён, считать, в каком направлении («вверх» или «вниз») действует гравитационное поле на антивещество, можно лишь гипотетически. В ОТО считается, что на антивещество и вещество гравитационное поле действует одинаково. Но это лишь гипотеза. Альтернативный вариант теории гравитации, различающий частицы и античастицы, рассматривается в настоящей книге. Согласно этому варианту, сила тяжести, действующая на античеловека в эксперименте № 3, направлена вверх. Для нахождения правильного ответа на вопрос о том, куда реально направлена сила тяжести, действующая на антивещество в гравитационном поле, необходим не мысленный, а реальный эксперимент.

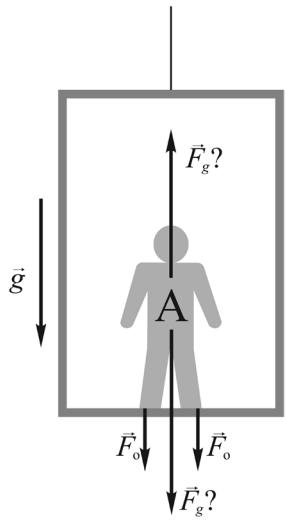



*Рис. 22.5. Античеловек в неподвижном лифте в поле тяжести*

**Эксперимент № 4**. Лифт ускоренно движется «вверх». Со стороны лифта на античеловека, стоящего на полу, действуют силы реакции опоры в направлении, противоположном движению лифта. Чтобы античеловек вместе с лифтом двигался «вверх», необходимо, чтобы на него, кроме реакции опоры, действовала ещё и другая сила – сила инерции $\vec{F}_i$ (рис. 22.6). Чтобы эта сила уравновешивала силу реакции опоры, она должна действовать в направлении ускорения лифта.

Сравним мысленные эксперименты № 3 и 4 (см. рис. 22.5 и 22.6). Видно, что вывод об эквивалентности тяжёлой и инертной масс для вещества и антивещества может быть справедлив и в том случае, когда силы, действующие

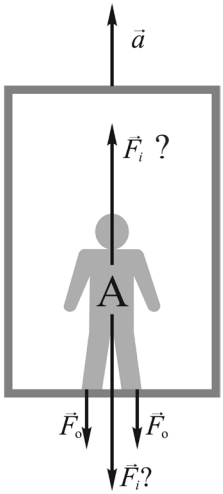



*Рис. 22.6. Античеловек в ускоряющемся лифте в отсутствие поля тяжести*

на вещество и антивещество в гравитационном поле, направлены противоположно и при этом противоположно направлены ещё и силы инерции.

**Замечания.** В связи с мысленными экспериментами Эйнштейна, касающимися движения частиц и античастиц в гравитационных полях и неинерциальных системах отсчёта, выскажем следующее замечания:

1. Лифт находится не в пустоте, а погружён в вакуумную материю.

2. Силы инерции – это не фикция, а то, что связано с взаимодействием реальных частиц/античастиц с вакуумом.

3. Не очевидно, что силы, действующие на частицы и античастицы со стороны вакуума, при одинаковых условиях совпадают.

Полагаем, что с учётом этих замечаний следует искать ответ на вопрос: будет или нет различаться поведение микроскопических частиц и античастиц, а также макроскопических тел и антител при одинаковых условиях в гравитационных полях? Для нас ответ на этот вопрос не является очевидным. Выскажем некоторые соображения по этому поводу.

## 22.6. Реальные и фиктивные силы инерции

Рассматривая мысленные эксперименты Эйнштейна в лифте, необходимо учитывать существенно разное поведение тел, связанных с лифтом и не связанных с ним. Проведём анализ этих экспериментов в ньютоновском приближении. Предполагаем, что вакуум является гравитационно-нейтральным и выделяет привилегированную инерциальную систему отсчёта $K_0$ (см. гл. 21). Считаем, что лифт является твёрдым телом и с ним связана неинерциальная система $K'$, движущаяся относительно $K_0$ поступательно с постоянным ускорением $g$. Оси $OX$ и $OX'$ систем $K_0$ и $K'$ параллельны. Ускорение направлено вдоль оси $OX$.

Закон преобразования координат и времени при переходе от $K'$ к $K_0$ в ньютоновском приближении имеет вид

$$x = x' + V_0 t + gt^2/2,\ t = t', \tag{22.1}$$

где $V_0$ – скорость движения системы $K'$ относительно $K_0$ в момент времени $t = 0$.

Учитывая (22.1), уравнение движения тела массы $m$ относительно $K'$ в ньютоновском приближении запишем в виде

$$m\frac{d^2x'}{dt'^2} = F' = m\frac{d^2x}{dt^2} - mg = F - mg\,. \qquad (22.2)$$

Рассмотрим в рамках этого уравнения движение тела в системе $K'$ в двух предельных случаях.

Максимальную длину тело имеет в том случае, когда оно покоится относительно вакуума.

Случай I. Тело «вморожено» в неинерциальную систему $K'$. В этом случае его координата $x' = \text{const}$, а

$$F' = F - mg = 0. \qquad (22.3)$$

В рассматриваемом случае на тело в системе $K'$ действуют две противоположно направленные силы. Сила $F$ создаёт равноускоренное движение тела относительно системы $K_0$. Она обусловлена действием на тело лифта. Сила инерции $-mg$ связана с действием вакуума на ускоряемое относительно него тело. Эту силу в системе $K'$ можно трактовать как обусловленную влиянием гравитационного поля. В системе $K'$ имеет место равновесие этих сил. Тело в этой системе покоится. Имеет место его деформация. Она тем больше, чем больше скорость движения тела в вакууме. Влияние на тело сил $F$ и $-mg$ может быть экспериментально измерено. Если тело растягивается, то это означает, что скорость его движения в вакууме уменьшается и, наоборот, сокращение длины тела означает увеличение скорости его движения в вакууме.

Случай II. Тело движется относительно инерциальной системы $K_0$ равномерно и прямолинейно. В этом случае $x \sim t$, $F = 0$, изменения скорости движения тела относительно вакуума не происходит и его физические параметры остаются постоянными. Движение тела в системе $K'$ описывается уравнениями

$$\frac{d^2x'}{dt'^2} = -g, \quad x' = x - V_0t - gt^2/2\,. \qquad (22.4)$$

Тело относительно системы $K'$ движется с ускорением $-g$. Это движение можно трактовать как обусловленное влиянием однородного гравитационного поля. Оно связано не с изменением состояния рассматриваемого тела в вакууме, а с изменением состояния тела отсчёта $K'$ (лифта). Имеет место ускоренное движение лифта в вакууме. При этом меняются его физические параметры. Одновременно с этим меняется и состояние вакуума. Реакция вакуума на изменение состояния лифта проявляется в связанной с ним системе отсчёта $K'$ как влияние гравитационного поля. Это поле меняет состояние движения в вакууме частиц, связанных с лифтом. В то же время оно не меняет состояния движения в вакууме тех частиц, которые являются свободными и не связаны с лифтом. Изменение скорости свободных частиц относительно лифта не связано с действием на них реальных сил. Оно связано с изменением скорости движения лифта в ва-

кууме. Изменение скорости движения свободных частиц относительно системы $K'$ является чисто кинематическим и не обусловлено влиянием каких-либо сил.

Между случаями I и II имеется принципиальное различие. В случае I тело не является свободным. На него реально действуют два тела: лифт и вакуум. В случае II тело является свободным. На него не действует ни лифт, ни вакуум.

В первом случае силы инерции, действующие на тело, являются реальными, а во втором фиктивными. Это различие существенно, и его необходимо учитывать при решении проблемы природы сил инерции и гравитации.

## 22.7. Мысленные эксперименты и реальность

В п. 22.5 было качественно показано, что то, что рассматривается как реакция опоры и считается очевидным понятием, в случае соприкосновения вещества и антивещества таковым вовсе не является. Согласно двузнаковой гравитации силы инерции, действующие на тела, связаны с реакцией вакуума на изменение состояния их движения в нём. Не очевидно, что направление этих реакций (сил инерции) будет одинаковым и для тел, и для антител. Кажется, что так должно быть. Но проверялось ли это в прямом эксперименте? Нет! Поэтому это лишь гипотеза. Скорее всего, она не является правильной, а верна противоположная ей. Важным аргументом в защиту этой точки зрения является следующий. Теория гравитации, основанная на идее различия в гравитации частиц и античастиц, значительно проще, чем ОТО, объясняет наблюдаемую динамику Вселенной (см. гл. 18).

В то же время следует иметь в виду следующее. Непосредственно в реальных экспериментах утверждение о том, что в гравитационном поле или в ускоренно движущихся неинерциальных системах отсчёта, при одинаковых начальных условиях, все частицы и античастицы движутся одинаково, не доказано. Поэтому утверждение о том, что гравитация и инерция не различают частицы и античастицы, а также противоположное ему, пока следует рассматривать как гипотетические. В настоящее время в нескольких ведущих научных центрах мира предпринимаются попытки ответить на вопрос о различии или неразличии поведения частиц/античастиц в гравитации в прямом эксперименте [81]. Не менее важными являются, на наш взгляд, аналогичные экспериментальные исследования поведения частиц/античастиц в неинерциальных системах отсчёта.

## 22.8. «Одинаковые условия»

В мысленных экспериментах Эйнштейна существенным элементом является лифт – некоторое абстрактное понятие, используемое как тело отсчёта.

Считается, что это тело является абсолютно твёрдым. В этих экспериментах учитывается влияние лифта на рассматриваемые тела. При этом детали этого влияния (реакции опоры) не описываются. Предполагается, что они являются очевидными.

Правомерность использования такого понятия, как «лифт», в анализе природы сил инерции и гравитации вызывает сомнения, поскольку без особых на то оснований считается, что частицы и античастицы могут при одинаковых условиях покоиться относительно него. При этом неявно предполагается, что влияние лифта на частицы и античастицы является одинаковым и их реакция на него также одинакова.

В п. 22.5 было качественно показано, что то, что рассматривается как реакция опоры и считается очевидным понятием, в случае соприкосновения вещества и антивещества таковым вовсе не является.

В эйнштейновских мысленных экспериментах (см. п. 22.2 и 22.5) считается само собой разумеющимся, что при одинаковых условиях силы инерции, действующие на тела и антитела, сообщают им одинаковые ускорения. Нам не кажется, что это очевидно по двум причинам.

1. Соответствующие исследования не проводились для макроскопических тел, состоящих из антивещества, в силу отсутствия таковых в окружающем нас мире.

2. Есть основание считать, что в экспериментах с элементарными частицами уже давно доказано, что при одинаковых условиях реальные силы инерции, действующие на частицы и их античастицы, равны по величине, но направлены противоположно.

Поясним справедливость последнего утверждения на следующем примере. Пусть частица и её античастица, имеющие электрические заряды, находятся в электромагнитном поле. В этом случае в любой локально-инерциальной системе отсчёта при одинаковых условиях электромагнитные силы, действующие на них, равны по величине, но направлены противоположно, вследствие различия их электрических зарядов. При этом очевидно, что и реальные силы инерции, действующие на частицу и античастицу в неинерциальных системах отсчёта, в которых они покоятся, в любой точке электромагнитного поля направлены противоположно. Если силы инерции, действующие на частицу и её античастицу в электромагнитном поле, в системах, в которых они покоятся, трактовать как обусловленные влиянием гравитационного поля, то они отличаются знаком. Вследствие этого различия частица и её античастица, имеющие в начальный момент одинаковые координаты и скорости, в одном и том же электромагнитном поле будут расходиться. При этом следует иметь в виду, что и неинерциальные, сопутствующие для заряженных частиц и их античастиц системы отсчёта, локально совпадающие в начальный момент, будут также расходиться.

Учитывая это, предполагаем, что идея о лифте, как системе отсчёта, в которой частицы и античастицы движутся при одинаковых условиях одинаково, являет-

ся ложной. Невозможно ввести единую для элементарных частиц и античастиц неинерциальную систему отсчёта, в которой они двигаются одинаково.

Приведённые соображения являются, на наш взгляд, указанием на разумность идеи о том, что при одинаковых условиях влияние сил инерции и гравитации на частицы и античастицы различается. Эта идея лежит в основе двузнаковой гравитации.

## 22.9. Вакуум-пространство-время

В ньютоновской механике считается, что причиной действия сил инерции является неравномерность или непрямолинейность движения тел относительно абсолютного пространства $R_1$. Однако ньютоновское пространство $R_1$ является гипотетическим не наблюдаемым телом отсчёта. Ему нельзя приписать какие-либо физические свойства, наличие которых позволяет осуществлять его влияние на неравномерно движущиеся в нём тела. В ньютоновской механике пространство $R_1$ не может являться реальной причиной сил инерции.

Принципиально другая ситуация в двузнаковой гравитации. В этой теории причиной сил инерции, действующих на тела, является неравномерность и непрямолинейность их движения относительно вакуума. Вакуум, в отличие от ньютоновского абсолютного пространства $R_1$, является материальным образованием, хотя и не состоящим из реальных частиц и античастиц. Он, в отсутствие обычной материи, как и пространство $R_1$, является однородным и изотропным. Частицы и античастицы являются его возбуждёнными состояниями. В случае когда их параметры не меняются, то они движутся в вакууме равномерно и прямолинейно. Всякое изменение параметров частиц и античастиц – это одновременно и изменение состояния вакуума.

Движение частиц и античастиц в неоднородном вакууме не является равномерным и прямолинейным, и это в двузнаковой гравитации трактуется как следствие влияния на них гравитационного поля.

Состояния частиц, античастиц и вакуума взаимосвязаны. Вакуум согласованно реагирует на любые изменения состояний частиц и античастиц в нём. Всякое изменение этих состояний одновременно сопровождается также изменением и состояния вакуума. Силы инерции являются проявлением реакции вакуума на эти изменения. Они возникают одновременно с изменением параметров частиц и античастиц. Изменение параметров реальных частиц и античастиц возникает за счёт их взаимодействия. В современной физике различают четыре фундаментальных взаимодействия: сильное, слабое, электромагнитное и гравитационное. Каждое из них может быть причиной изменения состояния частиц и античастиц, а следовательно, и вакуума. Состояния вакуума, частиц и античастиц являются самосогласованными.

Чтобы на тело в неинерциальной системе отсчёта действовали реальные, а не фиктивные силы инерции, должно иметь место изменение скорости или направления его движения относительно вакуума. Например, чтобы в ускоренно движущемся лифте тело «чувствовало» действие реальных сил инерции, оно должно быть «вморожено» в лифт. При этом лифт, действуя на тело, изменяет скорость его движения относительно вакуума. Вакуум «подстраивается» под это изменение, уравновешивая действие на тело лифта равным ему по величине, но противоположно направленным противодействием. Это противодействие вакуума проявляется в системе отсчёта, связанной с лифтом, как действие на тело сил инерции.

Пока скорости, а также направления движения частиц/античастиц относительно вакуума не меняются, они находятся в состоянии «невесомости» и реальные силы инерции на них не действуют. Эти силы возникают в тот момент, когда начинает происходить изменение состояния движения частиц и античастиц в вакууме. Вакуум подстраивается под эти изменения. Влияние вакуума частицы и античастицы воспринимают как действие на них сил инерции, которые могут быть интерпретированы и как силы гравитации. Согласно двузнаковой гравитации, при одинаковых условиях, это действие вакуума на частицы и античастицы является различным.

С учётом такого представления о природе сил инерции необходимо уточнить и существующие представления о гравитации. Гравитацию следует связывать не только с искривлённостью пространства-времени, но одновременно и с его «материальной» составляющей – физическим состоянием вакуума. В двузнаковой гравитации вакуум-пространство-время является единым физическим объектом. Искривлённость пространства-времени – это не только изменение геометрии, но одновременно и изменение физических параметров вакуума. Вакуум может сжиматься и растягиваться, изменяя при этом не только свою геометрию, но одновременно и физические свойства. Вакуум-пространство-время обладает не только геометрическими, но и материальными свойствами – плотностью энергии, давлением, а также электрической и гравитационной поляризациями.

В описанной выше интерпретации реальные силы инерции неразрывно связаны с фундаментальными взаимодействиями. Инерция является реакцией вакуума на изменения состояний частиц и античастиц, обусловленных этими взаимодействиями. В двузнаковой гравитации все фундаментальные взаимодействия, в том числе гравитацию и инерцию, логично связывать с изменением физико-геометрических свойств объекта, определяемого нами термином «вакуум-пространство-время».

# ГЛАВА 23

# ФОТОНЫ И АНТИФОТОНЫ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ

## 23.1. Гравитационные заряды фотонов и антифотонов

В настоящем пункте на частном примере аннигиляции электрон-позитронной пары рассмотрена задача определения гравитационных зарядов фотонов/антифотонов.

Античастицы рассматриваются, следуя Фейнману, как частицы, но с отрицательной энергией и движущиеся во времени вспять. Считается, что гравитационные заряды частиц и античастиц определяются их энергиями и имеют противоположные знаки.

Рассмотрение проводится в системе центра масс аннигилирующей электрон-позитронной пары. Предполагается, что орбитальный момент аннигилирующей пары равен нулю. Используется система единиц $\hbar = 1$, $c = 1$.

**Аннигиляция на фотон и антифотон.** В рассматриваемом случае имеют место следующие законы сохранения:

– закон сохранения энергии:

$$\omega_\gamma = \varepsilon_0, \quad \omega_{\overline{\gamma}} = -\varepsilon_0 ; \tag{23.1}$$

– закон сохранения импульса:

$$\omega_\gamma + \omega_{\overline{\gamma}} = 0 ; \tag{23.2}$$

– закон сохранения момента:

$$S_\gamma + S_{\overline{\gamma}} = 0 ; \tag{23.3}$$

– закон сохранения гравитационного заряда:

$$\Omega_\gamma + \Omega_{\overline{\gamma}} = 0 . \tag{23.4}$$

Используются следующие обозначения: $\gamma$ – значок для фотона, $\overline{\gamma}$ – для антифотона, $\varepsilon_0$ – энергия электрона, $\omega_\gamma, S_\gamma, \Omega_\gamma$ – частота, спин, гравитационный заряд для фотона, а $\omega_{\overline{\gamma}}, S_{\overline{\gamma}}, \Omega_{\overline{\gamma}}$ – для антифотона.

Решения уравнений (23.1)–(23.4), согласованные с идеей двузнаковой гравитации о взаимосвязи гравитационных зарядов частиц и античастиц с их энергиями, имеют вид

$$S_\gamma = 1, \quad S_{\bar\gamma} = -S_\gamma, \quad \Omega_{\bar\gamma} = -\Omega_\gamma = -\varepsilon_0 . \tag{23.5}$$

В двузнаковой гравитации гравитационные заряды фотонов и антифотонов определяются их энергиями и имеют противоположные знаки. В рассматриваемом случае фотоны и антифотоны отличаются также и спиральностями.

Явно различие фотонов и антифотонов может проявиться в гравитации. В большинстве случаев они присутствуют в излучении в равных количествах. Нет оснований рассматривать антифотон как новую неизвестную частицу. Поведение фотонов и антифотонов экспериментально детально изучалось в микроскопических процессах, для которых существенно электромагнитное взаимодействие. В этих процессах интенсивность гравитационного взаимодействия на много порядков меньше, чем электромагнитного: $(e^2/Gm^2) \sim 10^{36}$–$10^{42}$ и поэтому не учитывается. В то же время закон сохранения энергии (гравитационного заряда) учитывается. Он налагает жёсткие ограничения на динамику любых элементарных процессов.

**Аннигиляция пары на три фотона/антифотона.** Рассмотрение проводится в системе центра масс аннигилирующей пары и определённом выборе системы координат (рис. 23.1).

Закон сохранения энергии:

$$\omega_1 = \varepsilon_0 = \omega_0, \ \ \omega_2 + \omega_3 = -\omega_0 = -\varepsilon_0. \tag{23.6}$$

Закон сохранения импульса:

$$\omega_1 + \omega_2 \cos\theta_2 + \omega_3 \cos\theta_3 = 0,$$
$$\omega_2 \sin\theta_2 - \omega_3 \sin\theta_3 = 0. \tag{23.7}$$

Закон сохранения момента

$$S_\gamma + 2S_{\bar\gamma} = \pm 1, \quad S_\gamma = -S_{\bar\gamma}. \tag{23.8}$$

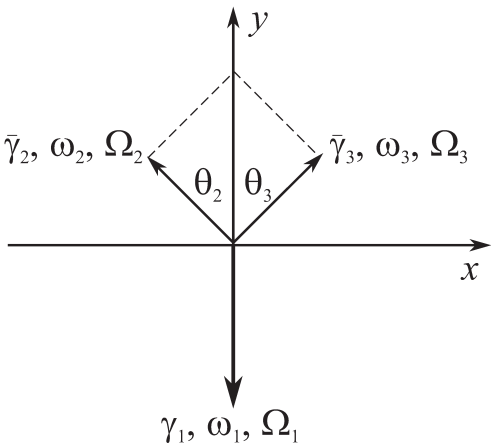



*Рис. 23.1. Схематическое изображение аннигиляции электрон-позитронной пары на фотон ($\gamma_1$) и два антифотона ($\bar\gamma_2$ и $\bar\gamma_3$). $\omega_i$ – частоты фотонов и антифотонов, $\Omega_i$ – их гравитационные заряды*

Гипотетически считаем, что фотоны и антифотоны отличаются спиральностями. Возможно, что это не так, и они отличаются лишь знаком гравитационного заряда. Эту гипотезу необходимо проверить экспериментально.

Из (23.6)–(23.7) находим:

$$\omega_1 = \omega_0 \sin(\theta_2 + \theta_3)/[\sin\theta_2 + \sin\theta_2 + \sin(\theta_2 + \theta_3)], \tag{23.9}$$

$$\omega_2 = -\omega_0 \sin\theta_3 / [\sin\theta_2 + \sin\theta_2 + \sin(\theta_2 + \theta_3)], \tag{23.10}$$

$$\omega_3 = -\omega_0 \sin\theta_2 / [\sin\theta_2 + \sin\theta_2 + \sin(\theta_2 + \theta_3)]. \tag{23.11}$$

Закон сохранения заряда:

$$\Omega_1 + \Omega_2 + \Omega_3 = 0. \tag{23.12}$$

Закон сохранения тока:

$$\Omega_1 + \Omega_2 \sin\theta_2 - \Omega_3 \sin\theta_3 = 0, \tag{23.13}$$

$$\Omega_2 \sin\theta_2 - \Omega_3 \sin\theta_3 = 0. \tag{23.14}$$

При записи (23.12)–(23.14) считается, что $\gamma_1$ – фотон, а $\overline{\gamma}_2$ и $\overline{\gamma}_3$ – антифотоны.

Условие существования нетривиального решения системы (23.12)–(23.14) имеет вид

$$\sin(\theta_2 + \theta_3) - \sin\theta_2 - \sin\theta_3 = 0. \tag{23.15}$$

Решение уравнений (23.12)–(23.14), согласованное с идеей двузнаковой гравитации о взаимосвязи гравитационных зарядов с энергией частиц-античастиц, имеет вид

$$\begin{gathered} \Omega_1 = \varepsilon_0,\ \Omega_2 = -\varepsilon_0 \sin\theta_3 / \sin(\theta_2 + \theta_3), \\ \Omega_3 = -\varepsilon_0 \sin\theta_2 / \sin(\theta_2 + \theta_3). \end{gathered} \tag{23.16}$$

Отсюда, учитывая (23.15), находим:

$$\Omega_2 + \Omega_3 = -\varepsilon_0. \tag{23.17}$$

При выполнении условия (23.15) формулы (23.9)–(23.11) запишутся в виде

$$\begin{gathered} \omega_1 = \omega_0,\ \omega_2 = -\omega_0 \sin\theta_3 / \sin(\theta_2 + \theta_3), \\ \omega_3 = -\omega_0 \sin\theta_2 / \sin(\theta_2 + \theta_3). \end{gathered} \tag{23.18}$$

При этом $\omega_2 + \omega_3 = -\omega_0 = -\varepsilon_0$.

Решением уравнения (23.15), соответствующим физически разумным решениям уравнений (23.9)–(23.11) и (23.16), является

$$\theta_2 = \theta_3 = 0. \tag{23.19}$$

Ему соответствуют следующие распределения энергий и гравитационных зарядов по фотонам/антифотонам:

$$\begin{aligned} &\omega_1 = \omega_0, \quad \omega_2 = \omega_3 = -\omega_0 / 2, \\ &\Omega_1 = \varepsilon_0, \quad \Omega_2 = \Omega_3 = -\varepsilon_0 / 2. \end{aligned} \tag{23.20}$$

Учитывая (23.19)–(23.20), можно сделать следующий вывод: согласно двузнаковой гравитации, аннигиляция электрон-позитронной пары на три фотона возможна, но при этом два из них должны двигаться вместе (в рассматриваемом нами примере – антифотоны) как одна частица со спином $s = \pm 2$. При этом фотоны и антифотоны имеют противоположные спиральности.

Гипотетически считается, что в любых процессах фотоны и антифотоны отличаются знаком энергии и, возможно, спиральностями. Если гипотеза верна, то это должно проявляться в наблюдениях, в противном случае необходимо будет считать, что у фотонов гравитационный заряд равен нулю. Вариант теории гравитации, в котором некоторые частицы и их античастицы тождественны друг другу, теоретически возможен и рассмотрен в гл. 26.

**Замечание.** В приведённом выше примере аннигиляции электрон-позитронной пары на фотоны и антифотоны предполагалось, что орбитальный момент пары равен нулю. В реальном эксперименте это может быть не так. Распределение углов разлёта при аннигиляции на три фотона зависит от орбитального момента аннигилирующей пары. В случае орбитального момента пары, отличного от нуля, угловое распределение аннигиляционных фотонов и антифотонов является более сложным, чем в рассмотренном нами простом случае.

## 23.2. Излучение в постоянном гравитационном поле

Рассмотрим возможность экспериментального доказательства существования антифотонов. Известно, что частота света, измеренная в собственном времени, равна $\omega = -\partial\Psi/\partial\tau$ [46. § 88], где $\Psi$ – эйконал. Она отличается в различных точках гравитационного поля.

В силу соотношения

$$\frac{\partial\Psi}{\partial\tau} = \frac{\partial\Psi}{\partial x^0}\frac{\partial x^0}{\partial\tau} \Rightarrow \omega = \frac{\omega_0}{\sqrt{g_{00}}}, \tag{23.21}$$

где $\omega_0$ – частота света в точках на луче, в которых гравитационное поле отсутствует, и $g_{00} = 1$.

Для фотонов и антифотонов изменение частоты при их движении в одном и том же гравитационном поле происходит различным образом. В слабом гравитационном поле для фотонов оно приближённо определяется формулой

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{\Phi}{c^2}\right), \tag{23.22}$$

а для антифотонов

$$\overline{\omega} = \omega_0 \left(1 + \frac{\Phi}{c^2}\right). \tag{23.23}$$

Эти формулы применим для расчёта смещения частот $\Delta\omega$ (для фотона) и $\Delta\overline{\omega}$ (для антифотона) при их переходе из места испускания, где потенциал $\Phi = \Phi_1$, в место наблюдения, где $\Phi = \Phi_2$. Учитывая (23.22) и (23.23), находим

$$\Delta\omega = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{c^2}\omega_0, \tag{23.24}$$

$$\Delta\overline{\omega} = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{c^2}\omega_0 = -\Delta\omega. \tag{23.25}$$

Экспериментальные методы позволяют измерять очень малые смещения частоты фотонов. Например, ещё в 1959 г. американским физикам Р. Паунду и Д. Ребке [98] удалось уверенно наблюдать с использованием эффекта Мёссбауэра гравитационное смещение спектральных линий при распространении света в поле тяжести Земли. Проходимый путь составлял по вертикали приблизительно 22 м. В этом случае ожидаемое смещение $\Delta\omega/\omega_0 \approx 2{,}6 \cdot 10^{-15}$. Измерения дали именно этот результат. Повторение аналогичных измерений для антифотонов, в предположении, что они существуют, является актуальной задачей.

Различие смещений частот фотонов/антифотонов в гравитационном поле может чётко проявиться в следующей ситуации. Если существуют антифотоны, то в гамма-спектрах излучения релятивистских объектов должны наблюдаться два максимума, смещённые относительно частоты $\nu_0 = mc^2/h$ ($m$ – масса электрона, $h$ – постоянная Планка) на величины

$$\Delta\nu = \pm\frac{GM}{c^2 R}\nu_0 = \pm\frac{1}{2}\cdot\frac{r_g}{R}\nu_0. \tag{23.26}$$

Эти максимумы можно было бы интерпретировать как соответствующие потокам фотонов и антифотонов, родившихся в процессе аннигиляции электрон-позитронных пар на поверхности релятивистских объектов, имеющих массу $M$ и радиус $R$; $r_g = 2GM/c^2$ – гравитационный радиус этих объектов. Возможно, будет наблюдаться также различие и в поляризациях аннигиляционных фотонов и антифотонов (см. 23.1).

## 23.3. Расщепление изображений релятивистских объектов

Можно ожидать, что в окрестности релятивистских объектов (нейтронных звёзд, чёрных дыр, активных ядер галактик и др.) интенсивно происходят процессы рождения/уничтожения частиц/античастиц и при этом в больших количествах, кроме фотонов, рождаются антифотоны. Если это так, то при наблюдении этих объектов на фоне гравитационных линз должны наблюдаться особенности в их гамма-изображениях, обусловленные различием закона распространения фотонов и антифотонов в гравитационном поле линзы. Гравитационные линзы, состоящие из вещества, являются собирающими для фотонов и рассеивающими для антифотонов. Влияние гравитационных линз, состоящих из антивещества, является противоположным. Наличие в $\gamma$-изображениях релятивистских объектов на фоне гравитационной линзы яркого центрального пятна и менее яркого обхватывающего его кольца, возможно, имеющих к тому же разные круговые поляризации, было бы серьёзным аргументом в поддержку правильности идеи о существовании антифотонов.

## 23.4. Искажение наблюдаемых форм гравитационных линз

Неоднородности космической среды являются для проходящего через них реликтового излучения гравитационными линзами. Есть основание предполагать, что наблюдаемая часть Вселенной состоит из вещества [19; 27]. Если это так, то в рамках двузнаковой гравитации наблюдаемые гравитационные линзы для фотонов являются собирающими, а для антифотонов рассеивающими.

В двузнаковой гравитации следует ожидать, что реликтовое излучение наполовину состоит из фотонов, а наполовину из антифотонов. Вследствие этого должны проявляться особенности в угловом распределении наблюдаемого реликтового излучения, проходящего через гравитационную линзу.

Если линза сферически симметричная, то при определённых условиях в реликтовом излучении она будет наблюдаться как имеющая более яркую центральную часть (фотоны) и более слабое кольцо, охватывающее её центральную часть (антифотоны). Если фотоны и антифотоны отличаются спиральностями (см. п. 23.1), то при этом должно наблюдаться различие в поляризациях излучения в центральной части изображения и на его периферии. В случае линз более сложной геометрической конфигурации эти особенности будут проявляться в изображениях отдельных её элементов.

Анизотропия температуры реликтового излучения, проявляющаяся в наличии пятен на его равномерном фоне, связана с существованием неоднородностей космической среды (гравитационных линз) не только в эпоху ре-

комбинации, но и в более поздние эпохи. Неочевидно, что при этом влияние возмущений эпохи рекомбинации было главным.

## 23.5. Анизотропия поляризации реликтового излучения

В рамках квантовой электродинамики фотоны и антифотоны рассматриваются как частицы. Чем они могут отличаться друг от друга? Возможно (см. п. 23.1), что, кроме гравитационных зарядов, они отличаются ещё и спиральностями. У одних из них проекция спина на направление движения $+h$, а у других $-h$. Это различие может лежать в основе экспериментального метода, позволяющего различать фотоны и антифотоны [35; 37; 41].

Если поток излучения содержит равное количество фотонов и антифотонов, то поляризация в нём будет отсутствовать. Но если в нём больше фотонов, чем антифотонов или наоборот, то это должно приводить к круговой поляризации потока, либо положительной, либо отрицательной.

Наличие на равномерном фоне реликтового излучения пятен указывает на существование неоднородностей материи в эпоху рекомбинации. В рамках двузнаковой гравитации они интерпретируются как миры и антимиры (см. гл. 25). Связанные с мирами и антимирами гравитационные поля по-разному действовали на фотоны и антифотоны в дорекомбинационную эпоху. Это явилось причиной наблюдаемого различия потоков фотонов и антифотонов из миров и антимиров в эпоху рекомбинации. Так, в рамках двузнаковой гравитации можно объяснить наблюдаемую анизотропию круговой поляризации в реликтовом излучении. Согласно этой теории в реликтовом излучении должна наблюдаться не только анизотропия в распределении температуры, но – если фотоны и антифотоны отличаются спиральностью – ещё и анизотропия круговой поляризации. Возможно, что именно это и проявляется в наблюдениях коллаборации BICEP2 [105]. На реликтовом фоне обнаружены поляризационные узоры особой формы, имеющие угловые размеры приблизительно равные одному градусу. Эти закрученные в реликтовом излучении структуры называют поляризацией $B$-моды.

## 23.6. Гамма-всплески. Антитяготение

В рамках двузнаковой гравитации может быть дано простое объяснение природы гамма-всплесков. Предполагаем, что они связаны с падением на массивные чёрные дыры компактных звёзд (белых карликов и нейтронных звёзд). Покажем, что одновременно с любым гамма-всплеском имеет место соизмеримый с ним по мощности всплеск антинейтринного излучения.

**Наблюдательные данные.** В 1968 г. детекторами американского космического аппарата «Вела» были зарегистрированы всплески отсчёта гамма-квантов. Сначала думали, что гамма-всплески рождаются сравнительно недалеко – в Галактике – и связаны с какими-то процессами на нейтронных звёздах [91].

Для детального изучения гамма-всплесков была запущена специализированная гамма-обсерватория «Комптон». Детекторы BATSE этой обсерватории регистрировали гамма-всплески почти ежедневно. Их продолжительность менялась от долей секунды до сотен секунд. Всплески возникали во времени случайным образом, а их угловое распределение на небесной сфере оказалось изотропным. Временные профили яркости для нескольких типичных гамма-всплесков, зарегистрированных детекторами BATSE [94], приведены на рис. 23.2.

Гамма-обсерватория «Комптон» регистрировала около трёхсот гамма-всплесков в год. С учётом поправок на пропуски, связанных с ограниченностью поля зрения датчиков, временные дыры в данных и малую эффективность регистрации слабых всплесков был сделан вывод: общее количество гамма-всплесков около 1 200–1 300 в год.

Анализ наблюдательных данных о гамма-всплесках выявил следующее [3; 55]:

- Гамма-всплески рождаются на космологических расстояниях. Многие из них имеют значительные красные смещения $z \geq 2$.
- Распределение гамма-всплесков на небесной сфере является изотропным.
- Показано, что значительная часть энергии, выделяющейся в гамма-всплесках, содержится в гамма-квантах, имеющих энергии десятки и сотни килоэлектронвольт, но иногда и значительно большие. Из наблюдений следовало, что значения энергии гамма-всплесков, если считать, что она излучается равномерно во все стороны, лежат в интервале $10^{51}$–$10^{55}$ эрг.

Энергиям $10^{51}$–$10^{55}$ эрг соответствуют массы $10^{30}$–$10^{34}$ г. Верхняя граница интервала этих масс соизмерима с массой Солнца ($m_{\odot} \simeq 2 \cdot 10^{33}$ г). Для сравнения отметим: энергии ($10^{51}$–$10^{52}$ эрг) выделяются при взрывах сверхновых за время порядка месяца и при этом значительная их часть уносится нейтрино. В гамма-всплесках такие и даже значительно большие энергии могут выделиться в виде энергичных гамма-квантов, имеющих энергии сотни и более килоэлектронвольт за доли секунды.

Для части гамма-всплесков определены их родительские галактики, для многих из которых измерены их красные смещения. Источники гамма-всплесков часто наблюдаются в оптическом и рентгеновском диапазонах. Оказалось, что оптическое послесвечение гамма-всплесков может быть в десятки и сотни тысяч раз ярче родительских галактик [3; 55; 83]. Максимальная светимость мощного гамма-всплеска бывает сопоставима с суммарной электромагнитной светимостью всех звёзд видимой Вселенной и составляет $\sim 10^{54}$ эрг/с [54].

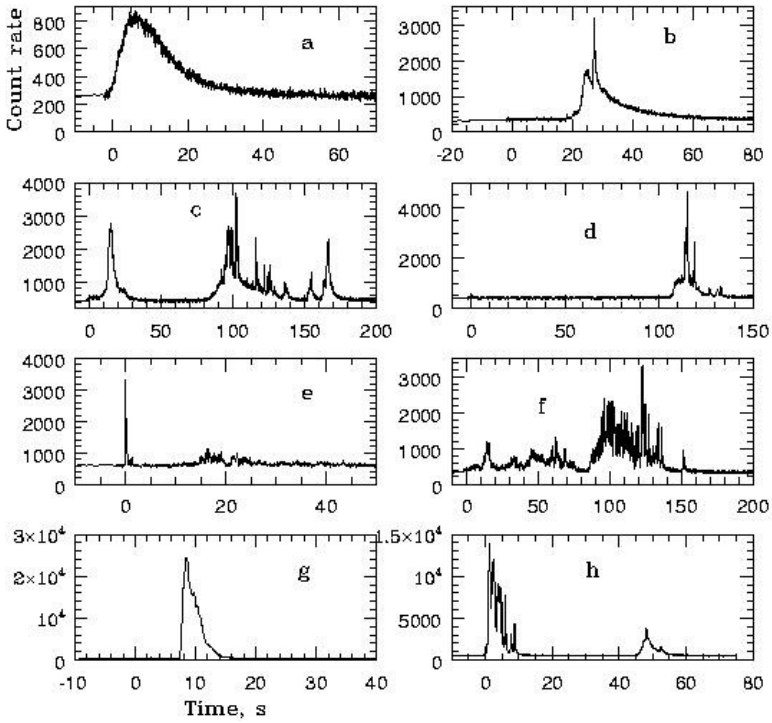



*Рис. 23.2. Профили яркости для нескольких типичных гамма-всплесков (данные BATSE) (по горизонтальной оси – время в секундах, по вертикальной – число отсчётов в секунду)*

Возникает вопрос о причинах и механизмах выделения такой большой энергии за короткое время гамма-всплеска.

**Существующее объяснение природы гамма-всплесков.** Широко распространена идея о том, что гамма-всплески являются следствием слияния двух нейтронных звёзд в чёрную дыру или коллапса гигантской звезды [79; 96]. Согласно этой идее гамма-всплески похожи на взрывы сверхновых, которые, как считается, связаны с гравитационным коллапсом ядер звёзд. Разница в последствиях – в случае сверхновых выбрасывается тяжёлая оболочка вещества, которое разлетается со скоростями $(1–3)\,10^4$ км/с и высвечивается в течение недель и месяцев. В то же время предполагается, что гамма-всплеск, в отличие от взрыва сверхновой, порождается излучением частиц, движущихся с ультрарелятивистской скоростью. Считается, что их лоренц-фактор $\gamma = (1 - \mathrm{v}^2 / c^2)^{-1/2}$ не меньше ста, иначе они не смогли бы испускать гамма-кванты наблюдаемых энергий. Предполагается, что в источниках гамма-всплесков существует эффективный механизм разгона больших масс материи до ультрарелятивистских скоростей.

Считается, что он связан с образованием релятивисткой ударной волны, идущей из центральной области огромной плотности источника гамма-

всплеска на его периферию, в область значительно меньшей плотности. При этом имеет место огромный рост амплитуды ударной волны. За фронтом этой волны возникает очень горячий спутный поток, лоренц-фактор которого более ста, в котором и содержатся гамма-кванты, которые и являются источником гамма-всплесков. Считается, что гамма-кванты, родившиеся за фронтом ударной волны, в спутном потоке в течение дней и десятков дней накапливаются и образуют импульс, протяжённость которого в системе земного наблюдателя в $\gamma^2 \approx 10^4$ раз меньше.

В описанном выше сценарии имеется масса неясных мест. Главные из них следующие. Каков механизм процесса перекачки энергии, выделяющейся при гравитационном коллапсе, в энергию гамма-квантов? Что определяет огромное разнообразие кривых яркости гамма-всплесков и их нетепловой спектр?

Кроме описанной выше идеи объяснения природы гамма-всплесков существуют и другие [9; 16; 22]. Многочисленные предлагаемые объяснения природы гамма-всплесков ещё никогда не были убедительными. Они скорее показывают лишь одно: существующие теории для объяснения этого явления не годятся, если не делать различного рода предположения, приводящие к значительному (на три-четыре порядка) уменьшению суммарной энергии гамма-всплесков). В рамках этих теорий не удаётся убедительно показать, как можно за доли секунды превратить массу порядка солнечной в гамма-кванты высоких энергий и изотропно излучить их в окружающее пространство. Возможно, в гамма-всплесках работает другой, более простой и естественный процесс, который не описывается в рамках существующих теорий.

В настоящей работе придерживаемся этой точки зрения. Полагаем, что существующие трудности объяснения природы гамма-всплесков, как и многих других физических явлений, связаны с ограниченностью общей теории относительности (ОТО).

На качественном уровне покажем, что простое и естественное объяснение природы гамма-всплесков может быть дано в рамках двузнаковой гравитацтии.

**Антигамма- и антинейтринные всплески.** Предполагаем, что гамма-всплески связаны с падением на объекты, определяемые в настоящее время как чёрные дыры, компактных космических тел, имеющих массы, соизмеримые с массой Солнца. Этими телами могут быть белые карлики и нейтронные звёзды. При падении на массивные чёрные дыры, масса которых значительно больше солнечной, эти звёзды разгоняются до энергий, соизмеримых с энергией их покоя. В чёрной дыре кинетическая энергия падающих звёзд идёт на рождение частиц и античастиц, которые в экстремальных условиях этого релятивистского объекта достаточно быстро превращаются в излучение (фотоны, антифотоны, нейтрино и антинейтрино). Согласно ОТО нет способа вывести их из чёрной дыры в окружающее пространство [46; 51]. Принципиально по-другому видится поведение античастиц, рождающихся в чёрной дыре, в

рамках двузнаковой гравитации. Согласно этой теории для античастиц чёрная дыра является мощнейшим центром антитяготения. За счёт антитяготения из чёрной дыры вылетают все образующиеся в ней античастицы (в рассматриваемом случае антифотоны и антинейтрино).

**Замечание.** При построении количественной теории гамма-всплесков следует иметь в виду, что для античастиц центрально-симметричное поле массы $M$ является не шварцшильдовским, а описывается метрикой К2. Метрика К2 отличается от метрики Шварцшильда заменой гравитационного радиуса $r_g$ на $-r_g$ ($r_g = 2GM/c^2$, где $M$ – масса чёрной дыры, $G$ – гравитационная постоянная, $c$ – скорость света) (см. гл. 16).

Черная дыра, в предлагаемом нами объяснении природы гамма-всплесков, выполняет роль мощного ускорителя не только для падающей на неё компактной звезды, но также и для вылетающих из неё античастиц (антифотонов и антинейтрино). Одновременно чёрная дыра выполняет ещё и роль компактной мишени, которая своим гравитационным полем фокусирует падающие на неё частицы в её центральную часть и создаёт благоприятные условия для преобразования их кинетической энергии в частицы и античастицы.

Предполагаем, что масса чёрной дыры значительно больше массы падающего на неё тела (белого карлика, нейтринной звезды). В этом случае размер области взаимодействия падающей звезды и массивной чёрной дыры определяется гравитационным радиусом $r_g$ последней. Длительность времени этого взаимодействия $\tau \sim r_g/c$.

Если в солнечных массах $M = 10^4$, то $\tau \sim 0{,}1$ с, если $M = 10^6$, то $\tau \sim 10$ с.

Величина $\tau$ определяет так же и характерное время выброса из чёрной дыры образовавшихся в ней антифотонов и антинейтрино, а следовательно, длительность антигамма-всплеска и, как предсказывает теория, сопутствующего ему антинейтринного всплеска.

Предлагаемое нами объяснение природы этих всплесков позволяет понять, как можно за время порядка секунды превратить массу порядка солнечной в фотоны и антифотоны, нейтрино и антинейтрино, а затем антифотоны и антинейтрино излучить изотропно в окружающее пространство.

Наличие во многих гамма-всплесках последовательности следующих друг за другом вспышек яркости (см. рис. 23.2) можно трактовать как связанное с разрывом падающего тела в окрестности чёрной дыры на много частей. Они отличаются друг от друга по массе, траекториями движения, а как следствие этого, и моментами начала преобразования их кинетической энергии в частицы и античастицы. В фазе излучения высокоэнергичных античастиц чёрная дыра находится в сильнонеравновесном состоянии. Следствием этого является нетепловой спектр всплесков. Наблюдаемый всплеск является в реальности наложением множества более мелких всплесков различной интенсивности.

Приведённые соображения позволяют, по крайней мере на качественном уровне, пояснить, в чём состоит причина большого разнообразия кривых яркости гамма-всплесков, а также и их нетеплового спектра.

В предлагаемом объяснении природы гамма-всплесков содержится ещё и важное предсказание: в нашем мире [35] имеют место не гамма-, а антигамма-всплески и одновременно с ними всплески антинейтринного излучения. Эти всплески имеют подобные параметры по энергетике и по длительности.

Учитывая огромную мощность предсказываемых всплесков антинейтринного излучения, можно пытаться их регистрировать. Они неразрывно связаны с хорошо регистрируемыми гамма-всплесками. Если между моментами регистрации антигамма- и соответствующих им антинейтринных всплесков будет обнаружен временной сдвиг, то это может быть использовано для очень точного определения параметров антинейтрино.

Отметим также, что можно гипотетически предполагать, что все фотоны высоких энергий в антигамма-всплесках имеют одинаковый знак спиральности [35; 37]. Если это подтвердится в наблюдениях, то будет свидетельством правильности гипотезы о том, что антифотоны отличаются от фотонов не только знаком гравитационного заряда, но, возможно, как нейтрино от антинейтрино, знаком спиральности.

Центральным элементом в предлагаемом объяснении природы гамма-всплесков (как мы предполагаем – антигамма-всплесков), а также и в предсказании в рамках этого объяснения существования антинейтринных всплесков является идея о различии влияния гравитации на частицы и античастицы. Исследования, направленные на выявление этого различия, осуществляются в ЦЕРНе коллаборацией АЛЬФА [81]. Эксперименты проводятся в условиях, в которых существенным является действие на частицы и античастицы электромагнитных сил. Эти силы по-разному влияют на частицы и античастицы и при этом на много порядков сильнее, чем гравитационные силы. Всегда будет оставаться возможность доказывать, что наблюдаемое различие в поведении частиц и античастиц связано с влиянием электромагнитных, а не гравитационных сил.

Главная цель этого раздела книги – обратить внимание специалистов в области астрофизики и физики элементарных частиц на нетривиальный способ доказательства «в чистом виде» различия влияния гравитации на частицы и античастицы.

Если будет доказано, что существует корреляция между рядами наблюдаемых антигамма- и антинейтринных всплесков, то это будет веским аргументом в пользу идеи о том, что гравитация различает частицы и античастицы и является двузнаковой.

Пример влияния сильных гравитационных полей на эмиссионные спектры излучения рассмотрен в следующей главе.

# ГЛАВА 24
# ГРАВИТАЦИОННОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Показано, что наблюдаемое расщепление эмиссионных линий объекта SS 433, возможно, связано с существованием антифотонов и является важным аргументом в защиту правильности идеи о том, что гравитация различает частицы и античастицы.

## 24.1. Наблюдаемое явление

В спектрах источника SS 433 наблюдаются яркие эмиссионные линии водорода, гелия и некоторых других элементов, имеющие следующие особенности. Около каждой основной линии существуют две дополнительные: $\lambda_{iB}$ – смещённая в синюю, и $\lambda_{iR}$ – смещённая в красную сторону относительно $\lambda_i$ (B – blue, R – red). При этом смещения $z_B = (\lambda_{iB} - \lambda_{i0})/\lambda_{i0}$ и $z_R = (\lambda_{iR} - \lambda_{i0})/\lambda_{i0}$ одинаковы для различных спектральных линий $\lambda_{i0}$. Спектральные линии $\lambda_i$, $\lambda_{iB}$ и $\lambda_{iR}$ являются узкими и чётко наблюдаемыми [64; 69; 85].

Наблюдаются периодические изменения во времени в противофазе величин $z_B$ и $z_R$. Амплитуда колебаний $z_B$ и $z_R$ значительно больше амплитуды колебаний красного смещения $z = (\lambda_i - \lambda_{i0})/\lambda_{i0}$ основных линий $\lambda_i$. В источнике SS 433 амплитуды $z_B \approx 0{,}095$, $z_R \approx 0{,}095$, $z \approx 0{,}002$. Смещения $z_B$ и $z_R$ взаимосвязаны. Выполняется соотношение $z_B + z_R \approx \text{const}$.

## 24.2. Существующее объяснение расщепления

Считается, что расщепление эмиссионных линий на три, в источнике SS 433, связано с доплеровским сдвигом длин волн. Предполагается, что в излучающем объекте имеются три области с подходящими условиями для излучения наблюдаемых эмиссионных линий и эти области движутся по отношению к наблюдателю с различной скоростью. Вследствие этого наблюдается не одна эмиссионная линия, а три: $\lambda_i$, $\lambda_{iB}$, $\lambda_{iR}$. Разброс лучевых скоростей излучающих атомов в рассматриваемых областях является малым, что объясняет узость спектральных линий. Движение областей, из которых происходит излучение линий $\lambda_{iB}$, $\lambda_{iR}$, является согласованным. Наблюдения показывают, что $z_R + z_B \approx \text{const}$.

Впервые идея трёх источников, ответственных за излучение линий $\lambda_i$, $\lambda_{iB}$ и $\lambda_{iR}$, предложена английскими астрофизиками А. Фабианом и М. Рисом [85]. Они предположили, что в SS 433 имеется некоторый объект (по-видимому,

аккреционный диск), из которого в противоположных направлениях истекают две узкие струи газа, имеющего температуру $(1–2)\cdot 10^4$ K. Одна из струй даёт излучение $\lambda_{iB}$, а другая – $\lambda_{iR}$.

Предполагаемая геометрия релятивистских струй в SS 433, согласно [85], приведена на рис. 24.1. Чтобы объяснить закономерности смещений линий $\lambda_{iB}$ и $\lambda_{iR}$ относительно $\lambda_i$ и их узость, приходится предполагать, что струи узкие ($\gamma \leqslant 1–2°$), скорость газовых потоков в них около 78 000 км/с и, кроме того, они прецессируют. Период прецессии ≈ 162,5 суток.

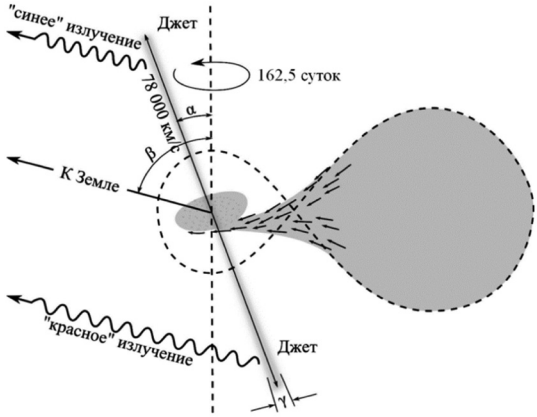



*Рис. 24.1. Геометрия релятивистских струй в SS 433 [85]. Углы* $\alpha \approx 20^o$, $\beta \approx 80^o$, $\gamma \leqslant 2^o$

Излучение эмиссионных линий происходит из областей, размер которых много меньше расстояния, на которое струи уходят за время, равное периоду прецессии. С учётом этого считается, что излучающие участки струй являются короткими прямолинейными отрезками.

Из-за прецессии струй их ориентация относительно наблюдателя изменяется. Периодически во времени изменяется угол, который излучающие участки струй составляют с лучом зрения. Вместе с этим углом периодически изменяются и их лучевые скорости. Считается, что модель струй правильно воспроизводит кривые красного смещения $z_R(t)$ и $z_B(t)$ источника SS 433 (рис. 24.2).

Изучение основных линий $\lambda_i$ показало, что они не стоят на месте, а совершают периодические смещения, но их амплитуды гораздо меньше, чем амплитуды смещений линий $\lambda_{iR}$ и $\lambda_{iB}$. Эти слабые смещения обусловлены движением излучающего источника со скоростью $V_1 \simeq 70$ км/с, что приблизительно в тысячу раз меньше, чем скорости струй. Период слабых смещений линий $\lambda_i$ в источнике SS 433 равен приблизительно 13 дням. Источник SS 433 представляет собой затменную двойную систему, состоящую из нормальной звезды спектрального класса $\sim B$ и релятивистского объекта, окружённого оптически ярким аккреционным диском, прецессирующим с периодом 162,5 дня. Из центральных частей аккреционного диска вырываются коллемированные релятивистские джеты, перпендикулярные к плоскости диска и отслеживающие прецессию диска. Считается, что источником спектральных линий $\lambda_i$ является «обычная» звезда двойной системы, а струи, истекающие из окрестности релятивистского объекта (нейтронной звезды, но возможно, и чёрной дыры), являются источником линий $\lambda_{iB}$ и $\lambda_{iR}$ [64; 69; 85].

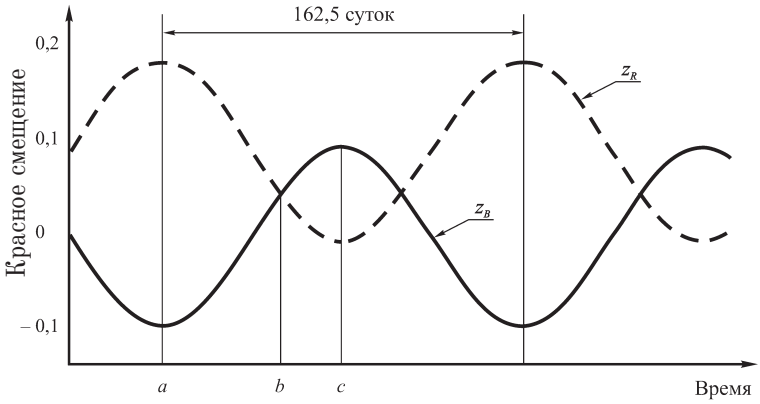



*Рис. 24.2. Периодические изменения красных смещений $z_R$ и $z_B$ для источника SS 433 [64; 69]. Характерные моменты a, b, c. $(z_R)a = 0{,}18$, $(z_B)a = -0{,}1$; $(z_R)b = (z_B)b = 0{,}04$; $(z_R)c = -0{,}01$, $(z_B)c = 0{,}09$. Во все моменты $z_R + z_B \approx 0{,}08$. Амплитуды колебаний $z_R$ и $z_B$ одинаковы и приблизительно равны 0,095. Колебания $z_R$ и $z_B$ происходят вокруг средних значений $\overline{z}_R = 0{,}085$ и $\overline{z}_R = -0{,}005$ соответственно. Кривая $z_R$ в среднем лежит выше, чем $z_B$ на величину 0,09*

Описанное объяснение расщепления спектральных линий является правильным, если выполняется ряд жёстких условий.

- Должен действовать механизм, стабильно поддерживающий существование двух «холодных» газовых струй, бьющих вдоль одной линии в противоположных направлениях со скоростями, соизмеримыми со скоростью света. Для SS 433 скорость струй приблизительно 0,27 c.
- Изменение скорости газопотока в областях, из которых в основном и идёт излучение линий $\lambda_{iR}$ и $\lambda_{iB}$, должно быть относительно малым, чтобы не происходило «размазывание» этих линий. Струи должны быть не только «холодными» ($T \leqslant 2{\cdot}10^4$ K), но и узкими ($\gamma \leqslant 1{-}2^\circ$).

Существование джетов, наличие в них огромных скоростей движения высокотемпературной плазмы, наличие периодов в 13,5 дней для линий $\lambda_i$ и 162,5 – для линий $\lambda_{iR}$ и $\lambda_{iB}$ – безусловно факты наблюдений. Что касается утверждений о наличии в джетах «холодных» потоков атомов, имеющих температуру $T \leqslant 2{\cdot}10^4$ K, скорость $V \approx 0{,}27$ c и являющихся узкими ($\gamma \leqslant 1{-}2^\circ$), то это, скорее всего, лишь фантастические гипотезы. В астрономии интерпретация наблюдений часто сильно зависит от предубеждений.

В следующем пункте опишем объяснение наблюдаемого расщепления эмиссионных линий источника SS 433, основанного на другом предубеждении. Возможно, оно является более реалистичным.

## 24.3. Альтернативное объяснение расщепления

В гл. 16 был описан вариант теории гравитации, различающей частицы и античастицы. В этой теории, названной двузнаковой гравитацией, в отличие от эйнштейновской гравитации между частицами и античастицами существует антитяготение. В двузнаковой гравитации предполагается, что у любой частицы, в том числе и у фотона, существует отличная от неё античастица. Возможно, что фотоны и антифотоны отличаются не только знаком гравитационного заряда, но и спиральностями (см. гл. 23).

Согласно двузнаковой гравитации гравитационное поле действует на фотоны и антифотоны по-разному. Звёзды, состоящие из вещества, притягивают фотоны и отталкивают антифотоны, и это может являться причиной расщепления эмиссионных линий. Расщепление оказывается значительным, если излучатель находится в сильном гравитационном поле. Рассмотрим эту идею подробнее.

Предположим, что идея об антифотонах является правильной. Считаем, что в области излучения фотонные и антифотонные эмиссионные линии атомов совпадают, а их спектральный состав описывается набором длин волн $\lambda_i$.

Чтобы объяснить, с учётом идеи об антифотонах, смещение и расщепление спектральных линий $\lambda_i$, рассматриваем следующую модель излучающей системы. Считаем, что излучение приходит из системы, состоящей из двух звёзд (рис. 24.3). Одна из них (A) является релятивистским объектом (нейтронной звездой или чёрной дырой), и её радиус составляет не более трёх-четырёх гравитационных радиусов $r_g(A)$, а вторая звезда (B) имеет размер в сотни тысяч раз больший, чем её гравитационный радиус $r_g(B)$.

Предполагаем, что поверхности, излучающие эмиссионные линии $\lambda_i$, находятся в окрестности этих звёзд. Та из них, которая близка к звезде A, находится на расстояниях нескольких $r_g(A)$ от её центра и является источником линий $\lambda_{iR}$ и $\lambda_{iB}$. Она является поверхностным слоем экваториальной по отношению к джетам кольцевой оболочки, охватывающей звезду A (см. рис. 24.3).

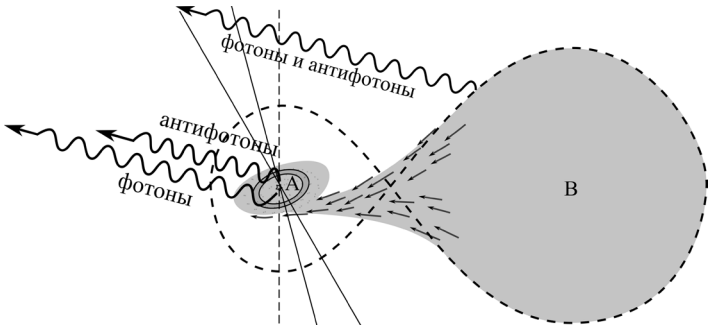



*Рис. 24.3. Предполагаемая конфигурация излучающей системы*

Другая, охватывающая звезду B, находится от её центра на расстояниях, во много раз больших её гравитационного радиуса $r_g(B)$, и является источником линий $\lambda_i$. Считаем, что расстояния этих поверхностей до центров звёзд могут меняться периодически во времени, и это определяется сложным комплексом магнитогазодинамических явлений в двойной звёздной системе [8].

Предполагаем, что выполняются температурные и другие условия для протекания процессов, порождающих излучение, содержащее наблюдаемые эмиссионные линии, а также обеспечивающие его выход в окружающее пространство. Полагаем, что объяснение возможности существования таких условий вблизи звезды A должно учитывать наличие мощного потока «холодного» излучения со звезды B на звезду A. Кроме того, должно учитываться влияние сильных магнитных полей, обеспечивающих поддержание огромных температурных градиентов между устьевыми областями истекающих джетов и экваториальной по отношению к ним кольцевой оболочкой, охватывающей звезду A. Предполагаем, что для источника SS 433 в окрестности звезды A на расстояниях нескольких $r_g$ от её центра существуют условия, при которых порождается излучение, содержащее эмиссионные линии водорода, гелия и некоторых других элементов.

В предлагаемом объяснении считается, что смещение линий $\lambda_i$, а также их расщепление на две серии $\lambda_{iR}$ и $\lambda_{iB}$ обусловлено двумя причинами: доплеровским эффектом, связанным с относительным движением источника и приёмника, и влиянием гравитационного поля звёзд A и B на фотоны и антифотоны.

Доплеровские сдвиги длин волн для фотонов и антифотонов, излучаемых одним и тем же источником, равны по величине. В случае двойных звёздных систем, характерные относительные скорости движения звёзд в них $V \sim 100$ км/с. Связанные с этими движениями доплеровские сдвиги длин волн $\Delta\lambda_i/\lambda_i \sim V/c \leqslant 10^{-3}$ являются малыми и далее не учитываются. Не учитываются по этой же причине и доплеровские сдвиги спектральных линий, обусловленные движением Солнца в Галактике и движением Земли вокруг Солнца. При необходимости эти доплеровские сдвиги можно легко учесть.

Если излучающие эмиссионные линии источники находятся достаточно далеко, то может иметь место значительное смещение спектральных линий, обусловленное расширением Вселенной. Эту возможность учитываем, предполагая, что хаббловское красное смещение для рассматриваемого источника равно $z_H$, а длины волн фотонов и антифотонов за время их перехода от источника до приёмника возрастают в $(1 + z_H)$ раз [27].

Рассматриваемый источник излучения состоит из двух сильно отличающихся звёзд. Влияние их гравитационных полей на излучаемые фотоны и антифотоны проявляется в разной мере.

Основная серия эмиссионных линий $\lambda_i$ связана с излучением источника, охватывающего звезду B. Этот источник находится на расстояниях $R \gg r_g(B)$ от центра звезды B. Вследствие этого влияние гравитационного поля этой

звезды на фотоны и антифотоны является пренебрежимо малым и поэтому не учитывается. Пренебрегаем доплеровским сдвигом линий $\lambda_i$, связанным с движением звезды B в двойной системе, а также с движениями Солнца в Галактике и Земли вокруг Солнца. Соответствующие сдвиги $\Delta\lambda_i \leqslant 10^{-3}\lambda_i$. Учитывая вышесказанное, формулу, определяющую взаимосвязь значений длин волн $\lambda_i$ основной серии в месте приёма и их значений $\lambda_{i0}$ в месте излучения, записываем в виде

$$\lambda_i = \lambda_{i0}\ (1 + z_H). \tag{24.1}$$

В (24.1) учтена возможность значительного хаббловского смещения линий.

Считаем, что сопутствующие основной серии линий $\lambda_i$ серии линий $\lambda_{iR}$ и $\lambda_{iB}$ излучаются поверхностью, охватывающей релятивистский объект A. Линии $\lambda_{iR}$ являются фотонными, а линии $\lambda_{iB}$ – антифотонными. Предполагаем, что эта поверхность находится от центра объекта A на расстояниях $R$ всего в несколько гравитационных радиусов $r_g(A)$, и влияние гравитационного поля релятивистского объекта A на фотоны и антифотоны является сильным.

Чтобы обеспечить наблюдаемую интенсивность эмиссионных линий необходимо, чтобы излучающая линии $\lambda_{iR}$ и $\lambda_{iB}$ поверхность была достаточно большой. Полагаем, что ею является заметная часть атмосферы газовой оболочки, охватывающей релятивистский объект A. Считаем, что она является сферической, и её расстояние $R$ от центра объекта A меняется со временем.

Предполагаем, что расстояние $R$ однозначно связано с ориентацией джетов относительно линии, соединяющей центры объектов A и B. Полагаем, что состояние атмосферы, охватывающей объект A, в значительной степени зависит именно от этого. Предполагаем, что излучающая линии $\lambda_{iR}$ и $\lambda_{iB}$ поверхность находится от центра объекта A на расстоянии всего в несколько гравитационных радиусов $r_g(\mathrm{A}) = 2GM_A/c^2$.

Излучающая поверхность, охватывающая релятивистский объект A, совершает радиальные колебания относительно центра. Её движение происходит в эффективном гравитационном поле, потенциал которого описывается функцией $\Phi_{eff}(R)$. Гравитационное поле $\Phi_{eff}(R)$, кроме гравитационного поля массы $M_A$ объекта A, учитывает также ещё влияние и других полей, которые эффективно действуют как гравитационные, например, центробежных [23; 45; 46]. Возможно, важным фактором, определяющим вид $\Phi_{eff}$, является поляризация вакуума в сильном гравитационном поле объекта A (см. гл. 27). Следует только иметь в виду, что сильное гравитационное поле объекта A может существенно влиять на поляризационные свойства вакуума.

Приближённое значение метрического коэффициента $g_{00}(R)$ на расстоянии $R$ от центра объекта A, учитывающего наличие эффективного гравитационного поля $\Phi_{eff}(R)$, может быть записано в виде

$$g_{00}(R) = 1 + 2\Phi_{eff}(R)/c^2. \qquad (24.2)$$

Здесь и далее учитываем, что в рассматриваемом случае поправки к частотам спектральных линий, обусловленные влиянием гравитационного поля, не превышают 10–20 %, и поэтому используем нерелятивистское приближение. При расчёте влияния гравитации на спектральные линии учитываем, что у фотонов в гравитационном поле, на траектории их движения, сохраняется величина $\nu\sqrt{g_{00}}$ [[46. § 87, 88]. Согласно двузнаковой гравитации вдоль траектории для антифотонов сохраняется величина $\overline{\nu}\sqrt{\overline{g}_{00}}$, где $\overline{\nu}$ – их частота, а

$$\overline{g}_{00} = 1 - 2\Phi_{eff}\left(R\right)/c^2. \qquad (24.3)$$

Учитывая сохранение величин $\nu\sqrt{g_{00}}$ и $\overline{\nu}\sqrt{\overline{g}_{00}}$, малость величины $\Phi_{eff}/c^2$, а также формулы (24.2) и (24.3), заключаем, что частоты фотонов и антифотонов, излучённых атмосферой источника А на расстояниях много больших чем $r_g$(А), становятся равными

$$\nu_{iR} = \nu_{i0}\left(1 + 2\Phi_{eff}\left(R\right)/c^2\right), \quad \nu_{iB} = \nu_{i0}\left(1 - 2\Phi_{eff}\left(R\right)/c^2\right) \qquad (24.4)$$

соответственно. Считаем, что на излучающей поверхности значения частот фотонных и антифотонных линий $\nu_{i0}$ совпадают.

Учитывая гравитационный сдвиг частот фотонов и антифотонов (24.4) при переходе их из области сильного гравитационного поля объекта А в точку приёма, где оно становится пренебрежимо малым, а также хаббловское смещение на пути их перехода от излучателя к приёмнику, формулы, определяющие значения длин волн фотонных линий $\lambda_{iR}$ и антифотонных $\lambda_{iB}$ в точке приёма, запишем в виде

$$\lambda_{iR} = \lambda_{i0}\left(1 - 2\Phi_{eff}\left(R\right)/c^2\right)\left(1 + z_H\right), \qquad (24.5)$$

$$\lambda_{iB} = \lambda_{i0}\left(1 + 2\Phi_{eff}\left(R\right)/c^2\right)\left(1 + z_H\right). \qquad (24.6)$$

Значение потенциала $\Phi_{eff}(R)$ в точке приёма полагается равным нулю. Формулы (24.1), (24.5) и (24.6) преобразуем к виду

$$\Delta\lambda_i = \lambda_{i0} - \lambda_i = z_H\lambda_{i0}, \qquad (24.7)$$

$$\Delta\lambda_{iR} = \lambda_{iR} - \lambda_{i0} = z_R\lambda_{i0}, \qquad (24.8)$$

$$\Delta\lambda_{iB} = \lambda_{iB} - \lambda_{i0} = z_B\lambda_{i0}. \qquad (24.9)$$

где

$$z_R = \left(1 + z_H\right)\left(1 - 2\Phi_{eff}\left(R\right)/c^2\right) - 1, \qquad (24.10)$$

$$z_B = \left(1 + z_H\right)\left(1 + 2\Phi_{eff}\left(R\right)/c^2\right) - 1. \qquad (24.11)$$

Схематичное изображение потенциала $\Phi_{eff}(R)$, для которого будет иметь место периодическое радиальное колебание слоя, излучающего линии $\lambda_{iR}$ и $\lambda_{iB}$, изображено на рис. 24.4. При таком виде функции $\Phi_{eff}(R)$ могут быть повторены все наблюдаемые особенности поведения графиков $z_R(t)$ и $z_B(t)$ (см. рис. 24.2).

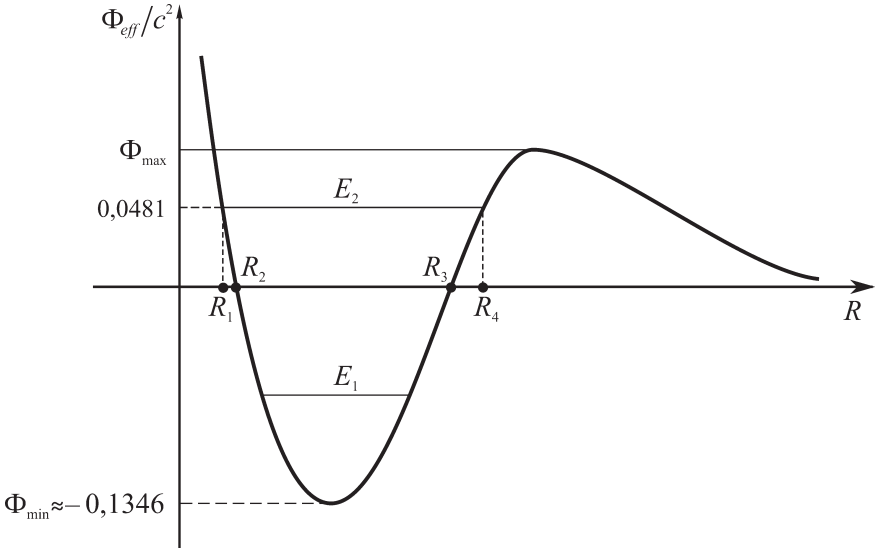



*Рис. 24.4. Качественный вид графика функции $\Phi_{eff}(R)$, при котором подбором его параметров можно добиться согласия предсказываемого двузнаковой гравитацией расщепления эмиссионных спектральных линий в гравитационном поле (см. (24.10), (24.11)) и наблюдаемого для источника SS 433 (см. рис. 24.2)*

При движении излучающего слоя в потенциальной яме $\Phi_{eff}(R)$, когда энергия частиц слоя $\Phi_{min} < E < \Phi_{max}$ (см. рис. 24.4), излучающий слой будет совершать периодические колебания. При этом, как видно из (24.5), (24.6), будут иметь место периодические колебания в противофазе линий $\lambda_{iR}$ и $\lambda_{iB}$.

В случае когда уровни энергий $\Phi_{min} < E < 0$, пересечения линий $\lambda_{iR}$ и $\lambda_{iB}$ не происходит и при всех допустимых $R$, $\lambda_{iR} > \lambda_{iB}$. Отсутствие пересечения графиков $z_R(t)$ и $z_B(t)$, в случае $\Phi_{min} < E < 0$ не соответствует наблюдаемому расщеплению линий $\lambda_{iR}$ и $\lambda_{iB}$ в источнике SS 433.

Для того чтобы были не только периодические колебания графиков $z_R(t)$ и $z_B(t)$ в противофазе, но и их пересечение, необходимо считать, что энергия частиц излучающего поля $0 < E < \Phi_{\max}$ (см. рис. 24.4). Считается, что в точке приёма $\Phi_{eff}(\infty) = 0$. В случае $0 < E < \Phi_{\max}$ имеет место не только колебание в противофазе линий $\lambda_{iR}$ и $\lambda_{iB}$, но и в точках $R_2$ и $R_3$ их пересечение. При этом в областях $R_1 < R < R_2$ и $R_3 < R < R_4$ график $z_{iB}$ будет лежать выше графика $z_{iR}$, а в области $R_2 < R < R_3$ $\lambda_{iR} > \lambda_{iB}$. В точках пересечения графиков $\lambda_{iR}$ и $\lambda_{iB}$ ($\Phi_{eff}(R) = 0$, $R = R_2$, $R = R_3$, $z_B = z_R = z_H$).

Подбором параметров графика $\Phi_{eff}$ и уровня энергии $E$ можно обеспечить все наблюдаемые особенности поведения во времени величин $z_R(t)$ и $z_B(t)$ для источника SS 433 (см. рис. 24.4). Используя формулы (24.10) и (24.11), а также данные о значениях функций $z_R(t)$ и $z_B(t)$ в точках $a$, $b$, $c$ (см. рис. 24.2), найдём значения параметров функции $\Phi_{eff}(R)$ и уровня энергии $E_2$, при которых предлагаемое объяснение гравитационного расщепления эмиссионных линий источника SS 433 выглядит разумным.

Пересечение графиков $z_R(t)$ и $z_B(t)$ для источника SS 433 имеет место при значении, равном приблизительно 0,04. Это, как видно из формул (24.10) и (24.11), имеет место, если считать, что источник SS 433 имеет красное смещение $z_H = 0{,}04$. При этом, как следует из (24.10), (24.11), справедливо равенство

$$z_R(t) + z_B(t) = 2z_H \simeq 0{,}08.$$

Согласно предлагаемому объяснению источник SS 433 находится от нас на расстоянии 0,56 млрд световых лет.

Максимальное значение $z_R(t)$ и соответственно минимальное значение $z_B(t)$ ($(z_R)_a = 0{,}18$, $(z_B)_a = -0{,}1$ (см. рис. 24.2)) достигается, если считать, что $\Phi_{\min} \approx -0{,}1346c^2$.

Максимальное значение $z_B(t)$ и соответственно минимальное значение $z_R(t)$ ($(z_B)_c = 0{,}09$, $(z_R)_c = -0{,}01$ (см. рис. 24.2)) достигается при уровне энергии $E = E_2 = 0{,}0481c^2$.

Что касается объяснения периода колебаний линий $z_R(t)$ и $z_B(t)$, то он связан с формой кривой $\Phi_{eff}(R)$ в области $R_1 < R < R_4$, которая может быть подобрана такой, чтобы было полное соответствие расчётных $z_R(t)$ и $z_B(t)$ и наблюдаемых.

Считается, что период изменения положения поверхности, охватывающей объект А и излучающей эмиссионные линии $\lambda_{iR}$ и $\lambda_{iB}$, совпадает с периодом прецессии джетов. Для источника SS 433 этот период составляет приблизительно 162,5 суток. В предлагаемом объяснении прецессия джетов является фактором, определяющим положение излучающей поверхности, охватывающей объект А. Что касается скорости и температуры потоков плазмы в джетах

и степени их расходимости, то они в предлагаемом объяснении гравитационного расщепления спектральных линий не являются определяющими факторами. Наличие джетов и их прецессия, возможно, также и их нутация, оказывает значительное влияние на динамику атмосферы, охватывающей объект A и являющейся источником линий $\lambda_{iR}$ и $\lambda_{iB}$. Учёт этого фактора необходим для объяснения динамики расщеплённых спектральных линий.

## 24.4. Обсуждение результатов

Согласно двузнаковой гравитации, различающей частицы и античастицы и предполагающей, что у любой частицы, в том числе у фотона, существует античастица, каждая спектральная линия на выходе из гравитационного поля расщепляется на две. Расщепление тем больше, чем значительнее разность гравитационных потенциалов в точке излучения и приёма. Наблюдаемое расщепление спектральных линий источника SS 433 на две, возможно, подтверждает идею об антифотонах и является указанием на необходимость детального изучения эмиссионных спектров и других релятивистских объектов с учётом этой идеи.

В случае существования антифотонов эффект расщепления эмиссионных спектральных линий должен чётко проявляться во всех случаях, когда излучающая поверхность находится достаточно близко к поверхности релятивистского объекта, а эффекты уширения наблюдаемых спектральных линий несущественны.

Можно предположить, что благоприятные для наблюдения гравитационного расщепления эмиссионных линий условия должны иметь место в случае, когда их источник находится в окрестности квазаров. Это связано с тем, что предположительно ядра квазаров являются чёрными дырами и могут иметь огромные массы ($\sim 10^9\ M_\odot$). Градиенты гравитационных полей в окрестности таких чёрных дыр могут быть значительно меньшими, чем в окрестности релятивистских объектов, имеющих массы порядка массы Солнца [50; 51]. Параметры космической среды в окрестности квазаров могут быть «обычными» и подходящими для излучения эмиссионных линий. В то же время их гравитационное поле может оказывать сильное влияние на распространение фотонов и антифотонов. Существенное влияние на положение спектральных линий будет оказывать динамика излучающей поверхности, охватывающей ядро квазара. Качественно это пояснено на примере источника SS 433.

Согласно предлагаемому выше объяснению наблюдаемого расщепления спектральных линий этого источника, фотоны и антифотоны линий $\lambda_{iR}$ и $\lambda_{iB}$ отличаются друг от друга гравитационными зарядами, но, возможно, и спиральностями (см. п. 23.1). Если в реальности это так, то линии $\lambda_{iR}$ и $\lambda_{iB}$

должны иметь круговые поляризации разных знаков. Именно это, по нашему мнению, и следует прежде всего проверить. Если наблюдения подтвердят предположение о различии спиральностей фотонов и антифотонов, то наука получит эффективный метод для экспериментального изучения гравитации и связанных с ней явлений.

# ГЛАВА 25

# МИРЫ И АНТИМИРЫ

## 25.1. О механизме зарождения структур во Вселенной

В настоящей главе рассмотрен, как мы полагаем, наиболее вероятный механизм зарождения структур во Вселенной. В его основе лежит предполагаемое различие гравитационных зарядов частиц и античастиц.

В рамках двузнаковой гравитации показано, что в ранней Вселенной произошёл её распад на области, состоящие из вещества (миры), и области, состоящие из антивещества (антимиры).

Высказана гипотеза о том, что уже более пятнадцати лет астрономы наблюдают миры и антимиры. Ими, по мнению авторов, являются объекты, наблюдаемые как относительно яркие пятна на почти однородном фоне реликтового излучения, имеющие угловые размеры приблизительно один градус, но возможно и несколько меньше (0,25 градуса). Предполагается, что такими эти объекты были в эпоху рекомбинации.

Вопрос о структурах Вселенной, их зарождении и эволюции является одним из центральных в космологии [18; 19; 27]. Наблюдения тонкой структуры реликтового излучения показывает, что на его равномерном фоне имеются незначительные отклонения яркости.

Наблюдаются пятна. Они имеют характерный угловой размер, равный одному градусу. Амплитуда флуктуаций температуры реликтового излучения, обусловленная наличием этих пятен, составляет $\delta T_{rad}/T_{rad} \lesssim 10^{-5}$–$10^{-4}$. Учитывая этот наблюдательный факт, считают, что уже в эпоху рекомбинации в космической среде существовали возмущения плотности и температуры. Их амплитуда была порядка $10^{-5}$–$10^{-4}$ [19; 59; 70; 90]. В космологии считается, что существующие в современной Вселенной структуры (галактики и их скопления) возникли в результате эволюции этих возмущений [18; 27].

Современные теории, описывающие развитие неоднородностей в расширяющейся Вселенной, основаны на расчёте, в рамках существующей теории гравитации, эволюции возмущений при заданных начальных условиях. Известная неопределённость этих теорий заключается в выборе вида начальных возмущений. Этот выбор в значительной степени является произвольным. Например, в фундаментальной монографии [27. Гл. 14] отмечается следующее: «Чем обусловлено возникновение первичных возмущений, каков их характер – об этом существуют только смутные догадки».

В связи с неопределённостью в знании начальных возмущений рассматриваются различные гипотезы о них. Возможно, наиболее проработанным является

вариант адиабатических возмущений, основанный на гипотезе о потенциальных начальных возмущениях [19; 27]. Интересной является гипотеза о первичной турбулентности космической среды и развитая на её основе теории вихревых возмущений космической среды [52].

Красивой является идея Омнеса о симметричной по частицам и античастицам Вселенной и возмущениях, приводящих к распаду космической среды на области вещества и антивещества [95]. В последнее время она обсуждается редко. Полагают, что эту идею трудно обосновать в рамках ОТО и она не подтверждается наблюдениями. В [27] отмечается, что теория Омнеса встречается с такими трудностями, которые заставляют отказаться от предлагаемой им картины зарождения и роста структур во Вселенной.

Отметим некоторые из этих трудностей, которые, как полагают, «убивают» идею о симметрии Вселенной по частицам и античастицам. Согласно расчётам в рамках ОТО ещё в ранней однородной Вселенной весь симметричный мир пар частиц/античастиц должен был проаннигилировать. В симметричной Вселенной совершенно исключена возможность «выживания» позже, чем через $10^{-3}$ с после Большого взрыва не только вещества, но и антивещества [18; 27].

Главный недостаток теории Омнеса заключается в отсутствии механизма регулярного роста областей, занятых частицами и античастицами [27. Гл. 22]. Эта теория основана на эйнштейновской теории гравитации, не различающей частицы и античастицы. В ней отсутствует естественный механизм разделения частиц и античастиц.

В современной космологии считается, что наблюдаемая Вселенная состоит из «лишних» барионов, возникших в ранней Вселенной. Предполагают, что ещё в ранней Вселенной возникло спонтанное нарушение барион-антибарионной симметрии. На каждый миллиард пар барионов и антибарионов возник приблизительно один «лишний» барион [18; 27; 57].

В настоящей главе показано, что красивая идея о возникновении структур в результате распада Вселенной на области, состоящие только из вещества и только из антивещества, в рамках двузнаковой гравитации находит естественное обоснование. Показано, что этот распад происходил в результате действия регулярного механизма. Он обусловлен различием знаков гравитационных зарядов частиц и античастиц. Согласно двузнаковой гравитации одноимённые заряды притягиваются, а разноимённые отталкиваются. Это и явилось фактором, определившим зарождение и рост неоднородностей гравитационных зарядов в ранней Вселенной.

Используются следующие термины. Миры и антимиры – области пространства, заполненные веществом и антивеществом соответственно. В современной космологии считается, что имеет место барионная асимметрия и Вселенная – это Мир. В этой главе показано, что если идея о различии гравитационных зарядов частиц и античастиц является правильной, то ещё в ранние эпохи

эволюции Вселенная естественным образом распалась на бесконечное множество миров и антимиров. Наш Мир – лишь один из миров.

В рамках модели Вселенной нейтральной не только по электрическому, но и по гравитационному заряду, проблема начальных возмущений рассматривается без каких-либо произвольных предположений. Считается, что начальными возмущениями являются тепловые флуктуации космической среды. Это снимает неопределённость в задании начальных условий, имеющую место в других теориях возникновения структур во Вселенной.

## 25.2. О распаде Вселенной на миры и антимиры

Считаем, что космическая среда состоит из трёх компонент: вакуумной формы материи, вещества и антивещества. Вещество состоит из электронов ($e$), протонов ($p$), нейтронов ($n$), нейтрино ($\nu_e$, $\nu_\mu$, $\nu_\tau$) и фотонов ($\gamma$). Считаем, что Вселенная симметрична по частицам и античастицам. Состав антивещества: $\overline{e}, \overline{p}, \overline{n}, \overline{\nu}_e, \overline{\nu}_\mu, \overline{\nu}_\tau, \overline{\gamma}$. Не учитываются тёмная энергия и тёмная материя. Считается, что вакуумная материя является гравитационно-нейтральной.

При температурах значительно бóльших, чем пороговая для рождения барионов/антибарионов ($T \geqslant 10^{13}$ К), во Вселенной с высокой скоростью шли реакции их рождения и уничтожения. В ранней Вселенной их было более чем на 9–10 порядков больше, чем в современной Вселенной.

Изначально космическая среда была неоднородной. В ней существовали тепловые флуктуации. Их амплитуда была разной для различных масштабов. В объёмах, содержащих $n$ частиц/античастиц, начальная амплитуда тепловых флуктуаций концентраций частиц/античастиц $\delta n/n$ была на уровне $\sim 1/\sqrt{n}$ [31]. В расширяющейся Вселенной действовал механизм, обеспечивающий регулярный рост этих флуктуаций. Он был обусловлен различием знаков гравитационных зарядов у частиц и античастиц.

Согласно двузнаковой гравитации механизм расслоения первоначально равномерно перемешанных в ранней Вселенной частиц и античастиц состоял в следующем. Начальные тепловые флуктуации повышенной концентрации частиц создавали локальные гравитационные поля. Они притягивали в эти флуктуации частицы и выталкивали из них античастицы. Это создавало регулярный рост рассматриваемых флуктуаций. Симметричный процесс имел место во флуктуациях повышенной концентрации античастиц. Эти флуктуации втягивали античастицы и выталкивали частицы. Рост амплитуды возмущений концентраций частиц и античастиц в гравитационно-нейтральной расширяющейся Вселенной происходил до тех пор, пока в результате её охлаждения не началась интенсивная аннигиляция вещества и антивещества. К началу эпохи аннигиляции барионов/антибарионов амплитуда флуктуаций плотно-

сти частиц и античастиц достигала в объёмах, содержащих $\sim 10^{88}$ частиц/античастиц, значений $\delta\rho/\rho \sim \delta\overline{\rho}/\overline{\rho} \lesssim 10^{-10}$–$10^{-9}$. Она была малой, но на много порядков больше, чем амплитуда первоначальных тепловых флуктуаций, которая в рассматриваемых объёмах была на уровне $10^{-44}$. После завершения аннигиляции «выжили» лишь незначительные избытки частиц над античастицами и античастиц над частицами, имевшиеся во флуктуациях на начало эпохи аннигиляции. Расширяющаяся Вселенная распалась на зародыши миров и антимиров. Подавляющая часть барионов и антибарионов, имевшихся до аннигиляции, проаннигилировала и превратилась в излучение и слабовзаимодействующие нейтрино.

Эпохи эволюции Вселенной удобно характеризовать величиной красного смещения $z$, соответствующего им. Формула

$$z = (a_0/a) - 1$$

определяет красное смещение эпохи [27]. Здесь $a_0$ – масштаб современной Вселенной, а $a$ – её масштаб в рассматриваемую эпоху. Эпохе интенсивной аннигиляции барионов/антибарионов ($T \lesssim 3 \cdot 10^{12}$ К) соответствуют красные смещения $z_a \lesssim 10^{12}$.

После завершения аннигиляции электронно-позитронных пар, в эпоху $z \lesssim 10^9$, Вселенная окончательно распалась на миры и антимиры, погружённые в почти однородный, равномерно расширяющийся гравитационно-нейтральный Вакуум.

## 25.3. Уравнения, описывающие малые возмущения

В рамках двузнаковой гравитации исследуем линейную стадию развития неустойчивости, в результате которой Вселенная распалась на миры и антимиры.

Считаем, что в отсутствие возмущений макроскопического гравитационного поля нет. Вещество и антивещество равномерно перемешаны. Имеет место равномерное расширение Вселенной. Динамику возмущений изучаем в сопутствующей системе отсчёта. В силу малости возмущений исследование проводим в ньютоновском приближении. В этом приближении уравнение, описывающее гравитационное поле, принимает вид

$$\Delta\Phi = 4\pi G\left(\rho + \overline{\rho}\right), \tag{25.1}$$

где $\rho$ и $\overline{\rho}$ – плотности вещества и антивещества соответственно; $\Phi$ – гравитационный потенциал; $G \simeq 6{,}67 \cdot 10^{-8}$ см$^3$/с$^2$г – гравитационная постоянная.

Рассматриваем эпохи, в которые процессы рождения и уничтожения барионов/антибарионов ещё уравновешивали друг друга. Это имело место при

температурах, заметно бо́льших чем $3\cdot10^{12}$ К. Для этих эпох уравнения, описывающие сохранение «гравитационных зарядов» для вещества и антивещества, запишутся в виде

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+div(\rho\vec{u})=0, \tag{25.2}$$

$$\frac{\partial\overline{\rho}}{\partial t}+div(\overline{\rho}\vec{w})=0, \tag{25.3}$$

где $\vec{u}$ и $\vec{w}$ – поля скоростей для вещества и антивещества, соответственно.

Вещество и антивещество рассматриваем как две взаимопроникающие жидкости. Полагаем, что гравитационные массы частиц и античастиц различаются знаком. С учётом этих предположений уравнения движения для вещества и антивещества записываем в виде

$$\frac{\partial\vec{u}}{\partial t}+(\vec{u}\nabla)\vec{u}=-\frac{1}{\rho}\nabla P-\nabla\Phi-\nu(\vec{u}-\vec{w}); \tag{25.4}$$

$$\frac{\partial\vec{w}}{\partial t}+(\vec{w}\nabla)\vec{w}=-\frac{1}{\overline{\rho}}\nabla P+\nabla\Phi-\nu(\vec{w}-\vec{u}), \tag{25.5}$$

где $P$ – давление в космической среде, $\nu$ – эффективная частота столкновений частиц и античастиц. Как будет показано, трение между противотоками частиц и античастиц существенно влияет на процесс расслоения космической среды во Вселенной на миры и антимиры и, вследствие этого, учитывается.

Уравнения (25.1)–(25.5) используем для исследования распадной неустойчивости расширяющейся гравитационно-нейтральной космической среды. Исследование неустойчивости проводим в линейном приближении.

В гл. 17 рассмотрена динамика однородной изотропной гравитационно-нейтральной плоской Вселенной. Показано, что имеет место её равномерное расширение. Изменение масштаба Вселенной $a(t)$ описывается уравнением

$$a(t)=ct, \tag{25.6}$$

где $c$ – скорость света. Имеет место хаббловское расширение Вселенной. Параметр Хаббла

$$H(t)=\frac{1}{a}\frac{da}{dt}=\frac{1}{t}. \tag{25.7}$$

Невозмущённое хаббловское расширение может быть описано и в рамках уравнений (25.1)–(25.5). Из этих уравнений следует, что для невозмущённых параметров космической среды выполняются соотношения

$$\rho_0(t) = -\overline{\rho}_0(t), \quad \nabla\rho_0 = \nabla\overline{\rho}_0 = 0,$$
$$\nabla P_0 = 0, \quad \vec{u}_0(t) = \vec{w}_0(t) = H(t)\vec{r}. \tag{25.8}$$

Используя (25.8), из (25.1)–(25.5) находим

$$\frac{d\rho_0}{dt} + H(t)\rho_0 = 0; \tag{25.9}$$

$$\frac{dH}{dt} + H^2 = 0. \tag{25.10}$$

Интегрируя (25.9), (25.10), получаем

$$\rho_0 a^3 \sim \rho_0 t^3 = \text{const}, \quad H(t) = \frac{1}{t}, \quad a(t) = ct\,. \tag{25.11}$$

Предположим, что на расширяющуюся космическую среду, состоящую из равномерно перемешанных вещества и антивещества, наложено малое возмущение. Однородное, но переменное во времени значение $f_0$ любого из параметров космической среды получает возмущение $f_1$.

Легко показать, что в линейном приближении по возмущениям уравнения (25.1)–(25.5) могут быть записаны в виде

$$\Delta\Phi_1 = 4\pi G\rho_0\left(\delta\rho + \delta\overline{\rho}\right), \tag{25.12}$$

$$\frac{\partial\delta\rho}{\partial t} + H\vec{r}\nabla(\delta\rho) + \nabla\vec{u}_1 = 0, \tag{25.13}$$

$$\frac{\partial\delta\overline{\rho}}{\partial t} + H\vec{r}\nabla(\delta\overline{\rho}) + \nabla\vec{w}_1 = 0\,, \tag{25.14}$$

$$\frac{\partial\vec{u}_1}{\partial t} + H\vec{u}_1 + H(\vec{r}\nabla)\vec{u}_1 = -u_s^2\nabla\delta\rho - \nabla\Phi - \nu(\vec{u}_1 - \vec{w}_1)\,, \tag{25.15}$$

$$\frac{\partial\vec{w}_1}{\partial t} + H\vec{w}_1 + H(\vec{r}\nabla)\vec{w}_1 = -u_s^2\nabla\delta\overline{\rho} + \nabla\Phi - \nu(\vec{w}_1 - \vec{u}_1)\,. \tag{25.16}$$

Использованы обозначения

$$u_s^2 = (\partial P_0/\partial\rho_0), \quad \delta\rho = \rho_1/\rho_0\,, \quad \delta\overline{\rho} = \overline{\rho}_1/\rho_0\,. \tag{25.17}$$

Аналогичные уравнения для случая однородной расширяющейся космической среды, состоящей лишь из вещества, хорошо известны. Они записаны, например, в [27] и [18]. Впервые задача о малых возмущениях в однородной изотропной расширяющейся Вселенной в ньютоновском приближении рассматривалась Боннором [80]. Если в (25.12)–(25.16) положить

$\delta\overline{\rho}=0$, $\overline{w}_1=0$, то получим уравнения, описывающие задачу Боннора. Приводимое здесь исследование является более общим. Оно учитывает отличие гравитационных зарядов частиц и античастиц. Именно вследствие различия знаков гравитационных зарядов частиц и античастиц в ранней Вселенной существовал регулярный механизм расслоения Вселенной на миры и антимиры.

Система (25.12)–(25.16) является системой линейных уравнений в частных производных с коэффициентами, зависящими от времени. Считаем, как это обычно предполагается [18; 27], что вследствие расширения Вселенной происходит изменение длин волн, составляющих возмущение, и они меняются подобно её масштабу $a(t)$. Учитывая это, для решения системы (25.12)–(25.16) используем преобразование

$$f_1(\vec{r},t)=f_{1\vec{k}}(t)\exp\left(i\frac{\vec{k}\vec{r}}{a(t)}\right). \tag{25.18}$$

Это преобразование позволяет заменить операторы дифференцирования по пространственным переменным на алгебраические операции и получить систему линейных обыкновенных дифференциальных уравнений для Фурье-амплитуд $f_{1\vec{k}}(t)$. Учитывая (25.18), из (25.12)–(25.16) получаем

$$k^2\Phi_1=-4\pi G\rho_0\left(\delta\rho+\delta\overline{\rho}\right), \tag{25.19}$$

$$\frac{d\delta\rho}{dt}+i\frac{\vec{k}}{a}\vec{u}_1=0, \tag{25.20}$$

$$\frac{d\delta\overline{\rho}}{dt}+i\frac{\vec{k}}{a}\vec{w}_1=0\,, \tag{25.21}$$

$$\frac{d\vec{u}_1}{dt}+H\vec{u}_1+i\frac{\vec{k}}{a}(u_s^2\nabla\delta\rho+\Phi_1)+\nu(\vec{u}_1-\vec{w}_1)=0\,, \tag{25.22}$$

$$\frac{d\vec{w}_1}{dt}+H\vec{w}_1+i\frac{\vec{k}}{a}(u_s^2\nabla\delta\overline{\rho}-\Phi_1)+\nu(\vec{w}_1-\vec{u}_1)=0\,. \tag{25.23}$$

В уравнениях (25.19)–(25.23) значок «$\vec{k}$» в обозначениях Фурье-амплитуд опущен, чтобы не загромождать запись индексами.

Используя (25.19)–(25.23), получаем систему уравнений, определяющих эволюцию возмущений плотности вещества и антивещества. Они могут быть записаны в виде

$$\frac{d^2\delta\rho}{dt^2}+2H\frac{d\delta\rho}{dt}+\nu\left(\frac{d\delta\rho}{dt}-\frac{d\delta\overline{\rho}}{dt}\right)+f\left(a\right)\delta\rho+4\pi G\rho_0\delta\overline{\rho}=0\,, \tag{25.24}$$

$$\frac{d^2\delta\overline{\rho}}{dt^2}+2H\frac{d\delta\overline{\rho}}{dt}+\nu\left(\frac{d\delta\overline{\rho}}{dt}-\frac{d\delta\rho}{dt}\right)+f\left(a\right)\delta\overline{\rho}+4\pi G\rho_0\delta\rho=0\,, \tag{25.25}$$

где $f(a) = \left( \frac{k^2 u_s^2}{a^2} - 4\pi G\rho_0 \right)$.

В рассматриваемой задаче вещество и антивещество входят симметрично. В сопутствующей системе отсчёта скорости их движения в гравитационном поле в каждой точке равны по величине, но противоположны по направлению. Вследствие этого, сколько частиц приходит в некоторый объём, ровно столько же античастиц из него уходит, и наоборот. Меняется в пространстве и времени соотношение между количеством частиц и античастиц. В то же время суммарная концентрация частиц и античастиц меняется лишь во времени. Это изменение связано с расширением Вселенной. Учитывая вышесказанное, считаем, что до тех пор, пока вещество и антивещество находятся в локальном термодинамическом равновесии, выполняются соотношения

$$\vec{u}_1 = -\vec{w}_1, \quad \delta\overline{\rho} = -\delta\rho, \quad \nabla P = 0. \tag{25.26}$$

Согласно (25.26) изменение возмущений плотности в веществе и антивеществе происходит согласованно. Возмущения давления в рассматриваемый период отсутствуют. Они в космической среде возникли позже, в эпоху интенсивной аннигиляции.

С учётом соотношений (25.26) система уравнений (25.24), (25.25) сводится к одному. Оно имеет вид

$$\frac{d^2\delta\rho}{dt^2} + 2H\frac{d\delta\rho}{dt} + 2\nu\frac{d\delta\rho}{dt} - 8\pi G\rho_0\delta\rho = 0. \tag{25.27}$$

Используем это уравнение для анализа роста возмущений плотности барионов в ранней Вселенной.

## 25.4. Рост возмущений в ранней Вселенной

Идея проводимого в настоящей работе исследования заключается в следующем. Считаем, что при наличии возмущений плотности $\delta\rho$ и $\delta\overline{\rho}$ в остывающей Вселенной при температурах ниже, чем $3\cdot10^{12}$ К, не все барионы/антибарионы имели возможность проаннигилировать. В возмущениях, где был избыток частиц ($\delta\rho > 0$), остались «лишние» барионы, и наоборот, в возмущениях, где $\delta\overline{\rho} > 0$, остались «лишние» антибарионы. Соотношение между количеством барионов/антибарионов, не проаннигилировавших в рассматриваемых флуктуациях, к количеству фотонов в них определялось значением $\delta\rho$ в эпоху $T \simeq 3\cdot10^{12}$ К. Чтобы согласовать расчёты с наблюдениями, необходимо считать,

что $\delta\rho$ в эпоху аннигиляции барионов/антибарионов было приблизительно равным $10^{-9}$.

В рамках уравнения (25.27) исследуем принципиальную возможность роста $\delta\rho$ и $\delta\overline{\rho}$ в ранней Вселенной при температурах $T \geqslant 3{\cdot}10^{12}$ К до уровня $10^{-9}$. Предполагаем, что начальный уровень возмущений $\delta\rho(0)$ и $\delta\overline{\rho}(0)$ был на много порядков меньше, чем $10^{-9}$. Считаем, что возмущения $\delta\rho(0)$ и $\delta\overline{\rho}(0)$ имели тепловое происхождение. Интересуемся возмущениями, содержавшими приблизительно $n_0 \approx 10^{88}$ частиц/античастиц. В этом случае начальный уровень возмущений $\delta\rho(0)$ и $\delta\overline{\rho}(0)$ был на уровне $10^{-44}$ $(\delta\rho(0) \sim \delta\overline{\rho}(0) \sim 1/\sqrt{n_0} \sim 10^{-44})$ [31]. Выбор начальных возмущений такого масштаба связан с идеей рассматривать наблюдаемую часть Вселенной как следствие развития одной из флуктуаций, в которой после аннигиляции частиц/античастиц осталось не проаннигилировавшими приблизительно $10^{79}$ барионов. Это число соответствует современным представлениям об их количестве в видимой причинно-связанной части Вселенной.

Рост возмущений $\delta\rho$ приблизительно на 35 порядков (от начального $\delta\rho(0) \sim 10^{-44}$, до конечного $\delta\rho \sim 10^{-9}$) мог быть обеспечен, если выполнялись следующие условия. Имел место их экспоненциальный рост. Характерное время $\tau$ роста возмущений было приблизительно в 80 раз меньше, чем возраст Вселенной $t_a$ в эпоху интенсивной аннигиляции барионов/антибарионов.

При описании распада Вселенной на миры и антимиры считаем, что их начальный масштаб определялся размерами причинно-связанных областей в эпоху аннигиляции барионов/антибарионов ($T \leqslant 3{\cdot}10^{12}$ К).

Учитывая, что однородная изотропная гравитационно-нейтральная Вселенная расширяется равномерно, заключаем, что эпоха аннигиляции барионов/антибарионов имела место приблизительно через время

$$t_{\text{а}} = t_0/z_{\text{а}} \approx 4{,}2{\cdot}10^5 \text{ с} \tag{25.28}$$

после Большого взрыва. В оценке (25.28) считается, что возраст современной Вселенной $t_0 \simeq 14{\cdot}10^9$ лет, а аннигиляция барионов/антибарионов имела место при $z_{\text{а}} \approx 10^{12}$.

В эпоху, предшествующую аннигиляции барионов/антибарионов, космическая среда находилась в термодинамическом равновесии с излучением. Невозмущённая плотность энергии $\rho_0 c^2$ для вещества/антивещества в эту эпоху была одного порядка с плотностью излучения. Учитывая это, считаем, что при $T \geqslant 3{\cdot}10^{12}$ К

$$\rho_0 = \sigma T^4/c^2 \geqslant 10^{15} \text{ г/см}^3, \tag{25.29}$$

где $\sigma \simeq 7{,}56\cdot10^{-15}$ г·К$^{-4}$/с$^2$·см – постоянная Стефана – Больцмана. Соответствующее этой плотности характерное время

$$\tau_0 = (8\pi G r_0)^{-1/2}, \tag{25.30}$$

входящее в уравнение (25.27), оказывается $\lesssim 2{,}4\cdot10^{-5}$ с.

Характерным временем изменения невозмущённых параметров является величина $H^{-1}$. В модели равномерно расширяющейся Вселенной $H^{-1} = t$. Во времена предшествующие аннигиляции барионов/антибарионов $H^{-1} \lesssim 10^5$ с.

В интересующие нас эпохи эффективное время $\nu^{-1}$ между столкновениями частиц/античастиц, за исключением, возможно, самых ранних моментов эволюции Вселенной, много меньше характерного времени изменения её невозмущённых параметров. Вследствие этого считаем, что $\nu \gg H$, и в уравнении (25.27) влияние второго слагаемого на рост возмущений не учитываем.

Требуемый рост возмущений плотностей вещества/антивещества $\delta\rho$ и $\delta\overline{\rho}$ от $10^{-44}$ до $10^{-9}$ получается, если характерное время их роста составляет приблизительно около одной восьмидесятой от времени жизни Вселенной в эпоху аннигиляции барионов/антибарионов $t_a \approx 4\cdot10^5$ с. Предполагая, что это так, и, сравнивая характерные значения первого и последнего членов в уравнении (25.27), заключаем, что в ранней Вселенной в эпоху $z > 10^{12}$ влияние слагаемого $d^2\delta\rho/dt^2$ не является существенным.

С учётом приведённых выше оценок уравнение (25.27), описывающее рост возмущений $\delta\rho(t)$ в ранней Вселенной, приближённо может быть записано в виде

$$2\nu\frac{d\delta\rho}{dt} = 8\pi G\rho_0\delta\rho\,. \tag{25.31}$$

В оценочных расчётах, учитывая, что $\nu \sim n_0$, $\rho_0 \sim n_0$, где $n_0$ – невозмущённая концентрация частиц/античастиц, приближённо считаем, что величина

$$\tau = \frac{\nu}{4\pi G\rho_0} \tag{25.32}$$

в интересующие нас эпохи остаётся постоянной. В этом случае решение уравнения (25.31) с начальным условием

$$\delta\rho\Big|_{t=0} = \delta\rho(0) \tag{25.33}$$

имеет вид

$$\delta\rho(t) = \delta\rho(0)\exp(t/\tau)\,. \tag{25.34}$$

Величина $\tau$ определяет характерное время роста возмущений $\delta\rho$. Чтобы обеспечить рост возмущения $\delta\rho$ от уровня $10^{-44}$ при $t = 0$ до $10^{-9}$ при $t \approx t_a$, необходимо, чтобы время $\tau$ было следующим:

$$\tau \approx \frac{1}{80} t_a \approx 5 \cdot 10^3 \text{ с}. \qquad (25.35)$$

Учитывая (25.29) и (25.32), находим, что условие (25.35) выполняется, если эффективная частота столкновений в противотоках частицы-античастицы $\nu \approx 4 \cdot 10^{12}$ с$^{-1}$. Эта частота приблизительно на 11 порядков меньше, чем частота столкновений ядерных частиц, если считать, что их скорости движения околосветовые, а их концентрация $\approx 10^{39}$ 1/см$^3$ ($\rho_0 \simeq 10^{15}$ г/см$^3$). По-видимому, это означает, что в рассматриваемых условиях $\rho_0 \gtrsim 10^{14}$ г/см, $T \gtrsim 10^{13}$ К материя находилась в сверхтекучем состоянии.

Приведённые оценки показывают, что в ранней Вселенной могли существовать условия, при которых в объёмах, содержавших приблизительно $10^{88}$ частиц/античастиц, к началу эпохи аннигиляции, достигался рост $\delta\rho(t)$ до значений, приблизительно равных $10^{-9}$. После аннигиляции барионов/антибарионов Вселенная распалась на области, содержащие лишь барионы и области, в которых остались лишь антибарионы. В каждой из рассматриваемых областей их осталось приблизительно по $10^{79}$ штук. При этом в этих областях установилось барион-фотонное и антибарион-фотонное соотношение на уровне $10^{-9}$. По порядку величины именно таким и является число частиц в наблюдаемой части Вселенной, а также барион-фотонное соотношение, наблюдаемое в окружающем нас Мире [19; 27].

## 25.5. Обсуждение результатов

Приведённое исследование указывает на следующую возможность распада Вселенной на миры и антимиры.

В ранней Вселенной при $z > 10^{12}$, вследствие различия знаков гравитационных зарядов у частиц и античастиц действовал регулярный механизм роста возмущений гравитационных зарядов. Возмущения одного знака втягивали в себя частицы и выталкивали античастицы. Симметричная ситуация имела место в возмущениях другого гравитационного знака. Они втягивали античастицы и выталкивали частицы. Вследствие действия этого регулярного механизма и те и другие росли. Их количество было приблизительно одинаковым.

Рассматривался рост возмущений, в которых первоначально содержалось приблизительно $10^{88}$ шт. частиц и античастиц. Такой выбор количества частиц и античастиц в возмущениях связан с идеей рассматривать наблюдаемую часть Вселенной как одну из флуктуаций. Считаем, что вначале они имели тепловую

природу. В таких флуктуациях случайное начальное превышение числа частиц над числом античастиц в возмущениях одного знака, как и симметричное ему случайное начальное превышение числа античастиц над числом частиц в возмущениях другого знака, было на уровне $10^{-44}$.

В сопутствующей системе отсчёта в любой точке гравитационных полей, возникших возмущений, частицы и античастицы двигались с одинаковой, но противоположно направленной скоростью. Имел место экспоненциальный рост возмущений. Скорость их роста определялась равновесием сил гравитации и сил трения в противотоках «частицы-античастицы». Приведённые в п. 25.4 оценки показывают, что есть основания предполагать, что в ранней Вселенной характерное время роста избытка частиц над античастицами и, наоборот, в рассматриваемых флуктуациях составляло приблизительно $5{\cdot}10^3$ с. Вследствие экспоненциального роста к началу интенсивной аннигиляции барионов/антибарионов значения возмущений плотности $\delta\rho$ и $\delta\overline{\rho}$ успели вырасти приблизительно до величины $10^{-9}$.

В эпоху аннигиляции барионов/антибарионов подавляющая их часть погибла. Выжившими оказались лишь приблизительно один барион/антибарион на миллиард. Эта величина наблюдается в современной Вселенной для барион-фотонного соотношения. Согласно предлагаемому объяснению это соотношение определяется амплитудой возмущений гравитационных зарядов на момент начала барион/антибарионной аннигиляции.

После аннигиляции барионов/антибарионов в рассматриваемых возмущениях осталось приблизительно по $10^{79}$ барионов/антибарионов. В половине из них сохранились лишь барионы, а в другой половине лишь антибарионы.

Характерный масштаб образовавшихся зародышей миров и антимиров при $z \leqslant 10^{12}$ был приблизительно $10^6$ световых секунд. В этой оценке учитывается, что плотность массы вещества/антивещества в эпоху их аннигиляции упала приблизительно на 9 порядков и стала равной примерно $10^5$–$10^6$ г/см$^3$. Эти зародыши миров и антимиров были «вморожены» в релятивистскую расширяющуюся космическую среду, состоявшую из вакуума, электронов, нейтрино, фотонов и их античастиц. В эту эпоху подавляющая часть энергии обычной материи была заключена в её релятивистской компоненте.

При $z \leqslant 10^9$ ($T \leqslant 3{\cdot}10^9$ К) произошла аннигиляция электрон-позитронных пар и Вселенная окончательно распалась на миры и антимиры. Их масштаб в это время был приблизительно $10^9$ световых секунд.

Барионы ($p$, $n$) и электроны в мирах, антибарионы ($\overline{p}$, $\overline{n}$) и позитроны в антимирах ещё долго, приблизительно до $z \simeq 10^3$ ($T \approx 3{\cdot}10^3$ К), находились в термодинамическом равновесии с излучением. Закон расширения миров и антимиров в эпоху *от* $z \simeq 10^9$ до $z \simeq 10^3$ очень мало отличался от закона расширения Вселенной в целом. Слабое различие скоростей расширения Вселенной и миров/антимиров было связано с влиянием гравитационных полей

последних на их динамику. Оно привело к тому, что при $z \simeq 10^3$ температура миров/антимиров стала на $10^{-4}$–$10^{-5}$ больше, чем средняя температура космической среды во Вселенной.

Согласно модели равномерно расширяющейся Вселенной размер миров/антимиров в эпоху рекомбинации $z \simeq 10^3$ составлял приблизительно $14 \cdot 10^6$ световых лет (~4,2 Мпк). Согласно расчётам в рамках модели равномерно расширяющейся Вселенной, при таких линейных размерах миры и антимиры в настоящее время должны наблюдаться как объекты, имеющие угловой размер $\Delta\theta$, приблизительно равный одному градусу, при $\gamma \simeq 1{,}4$. Если $\gamma = 1$, то $\Delta\theta \simeq 0{,}25^\circ$ (см. гл.18).

Наблюдение тонкой структуры реликтового излучения показывает, что на его равномерном фоне имеются незначительные отклонения [59; 90]. Считается, что они являются свидетельством существования неоднородностей в распределении видимой материи в эпоху рекомбинации. Во многих местах реликтового фона чётко наблюдаются пятна, имеющие угловые размеры приблизительно один градус и меньше. Учитывая приведённые оценки, считаем, что есть основания предполагать, что эти пятна являются мирами и антимирами. По-видимому, они распределены в пространстве регулярно и являются наиболее крупными структурными элементами Вселенной. Мы находимся в одном из миров. Полагаем, что невозможность чётко видеть в полном объёме окружающие нас миры и антимиры связана с «загораживающим» влиянием неоднородностей, которые возникли в нашем Мире значительно позже его рождения.

Согласно теории гравитации, различающей частицы и античастицы, миры и антимиры вовсе не стремятся сближаться и сталкиваться. Они «вморожены» в равномерно расширяющийся Вакуум. Характерные современные размеры миров и антимиров приблизительно равны 14 млрд световых лет. Они отталкиваются друг от друга.

Изменение масштаба Вселенной $a(t)$ определяется формулой (25.6). Размеры $R(t)$ миров/антимиров меняются подобно масштабу Вселенной $a(t)$. Различие в скорости расширения гравитационно-нейтральной Вселенной и гравитирующих миров/антимиров связано с влиянием гравитационных полей последних на их динамику. Приближённо можно считать, что при $z \leqslant 10^9$ миры/антимиры расширяются как независимые хаббловские шары с практически однородным начальным распределением в них вещества/антивещества.

Впервые идея о зарядово-симметричной Вселенной высказана П. Дираком в 1933 г. в его Нобелевской лекции.

Основываясь на исследовании, проведённом в настоящей главе, есть основания предполагать, что ещё в эпоху $z \simeq 10^{12}$ ($T \leqslant 3 \cdot 10^{12}$ K) во Вселенной появились зародыши миров и антимиров, имевшие характерный размер приблизительно $10^6$ световых секунд. При $z \leqslant 10^9$ ($T \leqslant 3 \cdot 10^9$ K) произошла аннигиля-

ция электрон-позитронных пар, и Вселенная окончательно распалась на миры и антимиры. Их масштаб в это время был приблизительно $10^9$ световых секунд.

Согласно двузнаковой гравитации излучение, заполнявшее «вмороженные» в равномерно расширяющийся Вакуум миры и антимиры, находилось в термодинамическом равновесии с веществом в мирах и антивеществом в антимирах. Это продолжалось до эпохи рекомбинации $z \approx 10^3$ ($T \leqslant 3 \cdot 10^3$ K).

В эпоху рекомбинации вещество в мирах и антивещество в антимирах из состояния плазмы перешло в газообразное состояние. В эту эпоху произошёл «отрыв» излучения от вещества/антивещества. Миры и антимиры в эту эпоху имели размер, приблизительно равный $14 \cdot 10^6$ световых лет ($\simeq$4,2 Мпк) и были самыми крупномасштабными структурами во Вселенной. Амплитуда возмущений температуры излучения, связанных с наличием миров и антимиров, в эпоху рекомбинации была на уровне $10^{-4}$–$10^{-5}$.

В настоящее время миры и антимиры наблюдаются как пятна на равномерном фоне реликтового излучения, имеющие угловые размеры приблизительно один градус, но, возможно, что и несколько меньшие ($\approx 0{,}25\,^\circ$). Приходящее из миров и антимиров излучение покинуло их ещё в эпоху $z \simeq 10^3$, когда масштаб Вселенной был приблизительно в 1 000 раз меньшим, чем современный.

Согласно двузнаковой гравитации реликтовое излучение состоит из фотонов и антифотонов. Анизотропия реликтового излучения в этой гравитации одновременно означает и анизотропию потоков фотонов и антифотонов. Должны ли мы в этой теории считать, что потоки фотонов и антифотонов из миров и антимиров в точности совпадают? Полагаем, что нет. Вследствие различия влияния гравитации на фотоны и антифотоны в течение приблизительно $14 \cdot 10^6$ лет (до начала эпохи рекомбинации) в мирах и антимирах происходило их расслоение. В мирах фотоны шли к их центрам, а антифотоны к периферии. В антимирах этот процесс шёл в обратном направлении. Учитывая это, можно предположить, что в эпоху рекомбинации миры излучали больше антифотонов, чем фотонов, а антимиры, наоборот, излучали больше фотонов, чем антифотонов.

Фотоны и антифотоны, возможно, отличаются спиральностью (см. п. 23.1). Если это так, то различие потоков фотонов и антифотонов из миров и антимиров должно проявиться в наблюдениях. Излучение, приходящее из миров и антимиров, должно иметь круговую поляризацию противоположных знаков. Должна наблюдаться анизотропия круговой поляризации реликтового излучения с характерным угловым размером менее одного градуса. Возможно, именно это и проявляется в наблюдениях коллаборации BICEP2 [105].

# ГЛАВА 26

# ГРАВИДИНАМИКА

Высказано предположение: источником гравитационного поля являются инвариантные гравитационные заряды и их токи. Гравитационные заряды частиц и соответствующих им античастиц отличаются знаком. Одноимённые гравитационные заряды притягиваются, а разноимённые отталкиваются. Вселенная не только электронейтральна, но и гравитационно-нейтральна. Предложена теория гравитации, учитывающая эти предположения. Считается, что существуют частицы, тождественные своим античастицам, и их гравитационные заряды равны нулю. К ним, в частности, отнесены фотоны.

Идея об инвариантных гравитационных зарядах и их токах как источниках гравитационного поля аналогична идее об электрических зарядах и их токах как источниках электромагнитного поля. Учитывая это, рассматриваемый вариант теории гравитации, по аналогии с электродинамикой, называем гравидинамикой. На её основе построена космологическая модель Вселенной. Показано, что в рамках этой модели могут быть объяснены известные наблюдательные данные, для которых существенны космологические эффекты.

## 26.1. Основополагающие идеи гравидинамики

В гравидинамике сохранена идея Эйнштейна о взаимосвязи гравитационного поля с метрическими свойствами пространства-времени. «Геометрическая» часть уравнений гравидинамики совпадает с соответствующей частью уравнений Эйнштейна. Различие уравнений, гравидинамики от уравнений ОТО заключается в описании источников гравитационного поля.

В гравидинамике считается, что источниками гравитационного поля являются инвариантные гравитационные заряды. Они могут быть двух знаков. У частиц и соответствующих им античастиц, имеющих гравитационные заряды, они равны по величине, но противоположны по знаку. Одноимённые гравитационные заряды притягиваются, а разноимённые отталкиваются. Считается, что полный гравитационный заряд Вселенной равен нулю. Имеет место закон сохранения гравитационного заряда. Этот закон выполняется локально и содержится в уравнениях для гравитационного поля. Используется приближение механики сплошных сред. Задача определения величин гравитационных зарядов отдельных элементарных частиц не рассматривается.

Для проверки правильности идеи о гравитационных зарядах необходимо в наблюдениях увидеть или экспериментально доказать различие движения частиц и античастиц в гравитационном поле. Показать, что античастицы от-

талкиваются от вещества. Проведение соответствующих наблюдений и экспериментов является важнейшей задачей современной физики. Сложность таких исследований заключается в необходимости выявления влияния гравитационного поля на движение элементарных частиц на фоне неизмеримо большего влияния локальных электромагнитных полей.

## 26.2. Гравитационные заряды и принцип эквивалентности

Идея о гравитационных зарядах не согласуется с принципом эквивалентности. В связи с этим принципом отметим следующее.

В известных экспериментах [10; 102] равенство инертной и тяжёлой масс проверялось лишь для нерелятивистских макроскопических тел, состоящих из вещества. Априори нет оснований считать, что гравитация не различает частицы и античастицы. Это всего лишь гипотеза. Такой же гипотезой является предположение об инвариантных гравитационных зарядах, имеющих различные знаки у частиц и античастиц. Все эти гипотезы необходимо проверять экспериментально.

## 26.3. Состав космической среды

Считаем, что космическая среда состоит из трёх компонент: вакуумной материи, вещества и антивещества.

Современный состав вещества: электроны ($e$), протоны ($p$), нейтроны ($n$), нейтрино ($\nu_e$, $\nu_\mu$, $\nu_\tau$) и фотоны ($\gamma$), слабовзаимодействующие «тёмные частицы» ($D$), ($D$ – Dark), а также фотоны ($\gamma$). Природа слабовзаимодействующих $D$-частиц в настоящее время не понятна [18; 19]. Возможно, что идея о существовании тёмной материи является ложной (см. гл. 27).

В настоящей главе считаем, что Вселенная симметрична по частицам и античастицам. Состав античастиц: $\overline{e}, \overline{p}, \overline{n}, \overline{\nu}_e, \overline{\nu}_\mu, \overline{\nu}_\tau, \overline{D}, \overline{\gamma} \equiv \gamma$. Предполагаем, что фотоны и антифотоны тождественны друг другу и их гравитационный заряд равен нулю. Учитываем, что во Вселенной могут существовать нестабильные частицы (античастицы), но их влияние на её динамику несущественно.

Полагаем, что вакуумной материей является гравитационно-нейтральная материя. Уравнение состояния этой материи

$$P_N = -\frac{1}{3}\varepsilon_N . \qquad (26.1)$$

Значок «$N$» здесь и далее относится к величинам, описывающим гравитационно-нейтральный вакуум.

## 26.4. Уравнения гравидинамики

Учитывая идею об инвариантных гравитационных зарядах как источниках гравитационного поля, уравнения гравидинамики записываем в виде

$$(Q^{\mu\nu} + \overline{Q}^{\mu\nu} + Q_N^{\mu\nu}) = 0, \tag{26.2}$$

где

$$Q_N^{\mu\nu} = -\frac{c^4}{8\pi G} B^{\mu\nu}, \; B^{\mu\nu} = R^{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g^{\mu\nu}, \tag{26.3}$$

$Q_N^{\mu\nu}$ – тензор заряда-тока для вакуумной материи, а $Q^{\mu\nu} = \rho_g c^2 u^\mu u^\nu$, $\overline{Q}^{\mu\nu} = \overline{\rho}_g c^2 \overline{u}^\mu \overline{u}^\nu$ – тензоры гравитационного заряда-тока вещества и антивещества, соответственно, $\rho_g$ и $\overline{\rho}_g$ – плотности их гравитационных зарядов. Запись этих тензоров в таком виде является наиболее простой формой реализации идеи о том, что источником гравитационного поля является симметричный тензор второго ранга, определяющийся распределением гравитационных зарядов и их токов. Учитываем, что вещество и антивещество в гравитационном поле движутся по-разному.

В предлагаемой теории излучение является гравитационно-нейтральным, и поэтому его вклад в создание гравитационного поля не учитывается. Предполагаем, что вакуум также является гравитационно-нейтральным и для тензора $Q_N^{\mu\nu}$ независимо выполняются уравнения

$$\nabla_\nu Q_N^{\mu\nu} = 0. \tag{26.4}$$

Учитывая тождество [19; 46] $\nabla_\nu B^{\mu\nu} = 0$, заключаем, что в уравнениях (26.2) содержатся законы сохранения гравитационного заряда материи, состоящей из вещества и антивещества

$$\nabla_\nu (Q^{\mu\nu} + \overline{Q}^{\mu\nu}) = 0. \tag{26.5}$$

В ранние эпохи эволюции Вселенной, когда вещество и антивещество ещё были равномерно перемешанными, выполнялось равенство $Q^{\mu\nu} = -\overline{Q}^{\mu\nu}$.

Уравнения гравидинамики содержат в себе закон сохранения гравитационного заряда. В отличие от уравнений ОТО они не содержат уравнений движения частиц (античастиц), а также уравнений, описывающих негравитационные поля. Для замыкания системы уравнений гравидинамики необходимо дополнительно записать уравнения, описывающие рождение/уничтожение частиц и античастиц, а также уравнения, описывающие их движение и сохранение энергии. В гравидинамике описание гравитационного поля является по-

добным описанию электромагнитного поля в среде. В виде примера рассмотрим уравнения гравидинамики для слабых гравитационных полей.

## 26.5. Слабые гравитационные поля

Запишем уравнения (26.2), предполагая малость, по сравнению со скоростью света, макроскопических скоростей частиц/античастиц, а также считая, что и само гравитационное поле является слабым. В рассматриваемом предельном случае важной является лишь компонента $g_{00}$ метрического тензора [46. § 87]. Она может быть записана в виде

$$g_{00} = 1 + \frac{2\Phi}{c^2}, \tag{26.6}$$

где $\Phi$ – гравитационный потенциал.

Компоненты заряда-тока вещества/антивещества имеют вид

$$Q_\mu^\nu = \rho c^2 u_\mu u^\nu, \quad \overline{Q}_\mu^\nu = \overline{\rho} c^2 \overline{u}_\mu \overline{u}^\nu. \tag{26.7}$$

Считаем, что в нерелятивистском пределе $\rho$ и $\overline{\rho}$ – это плотности тяжёлой массы вещества и антивещества соответственно. Полагаем, что гравитационные заряды (тяжёлые массы) частиц/античастиц отличаются знаками.

Макроскопическое движение вещества/антивещества считается медленным. Вследствие этого пренебрегаем всеми пространственными компонентами 4-скорости: $u^\alpha = \overline{u}^\alpha = 0$ $(\alpha = 1, 2, 3)$. Учитывается только временна́я компонента $u^\mu$: $u^0 = \overline{u}^0 = 1$. Из всех компонент $Q_\mu^\nu$ и $\overline{Q}_\mu^\nu$ остаются только лишь

$$Q_0^0 = \rho c^2, \quad \overline{Q}_0^0 = \overline{\rho} c^2. \tag{26.8}$$

Учитывая (26.8), уравнения (26.2) записываем в виде

$$R_0^0 = \frac{4\pi G}{c^2}(\rho + \overline{\rho}). \tag{26.9}$$

При вычислении $R_0^0$ учитывается, что члены, содержащие произведения символов Кристоффеля $\Gamma_{\mu\nu}^\alpha$, во всяком случае являются величинами второго порядка малости. Члены, содержащие производные по $x^0 = ct$, являются малыми (по сравнению с членами с производными по пространственным координатам) как содержащие лишние степени по $1/c$. В результате находим

$$R_0^0 = R_{00} = \frac{\partial \Gamma_{00}^\alpha}{\partial x^\alpha}. \tag{26.10}$$

Подставляя

$$\Gamma^{\alpha}_{00} \approx -\frac{1}{2} g^{\alpha\beta} \frac{\partial g_{00}}{\partial x^{\beta}} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \Phi}{\partial x^{\alpha}}, \tag{26.11}$$

находим

$$R^{0}_{0} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^{\alpha} \partial x^{\beta}} \equiv \frac{1}{c^2} \Delta \Phi. \tag{26.12}$$

Учитывая (26.9), (26.12), уравнения гравидинамики в пределе слабых гравитационных полей записываем в виде

$$\Delta \Phi = 4\pi G(\rho + \overline{\rho}). \tag{26.13}$$

Для практического использования этого уравнения необходимо дополнительно записать уравнения, описывающие рождение/уничтожение частиц/античастиц, а также уравнения, описывающие их движение, а также сохранение энергии. В следующем разделе используем уравнения гравидинамики для исследования динамики однородной изотропной Вселенной.

## 26.6. Динамика однородной изотропной Вселенной

Считаем, что полный гравитационный заряд Вселенной равен нулю и в любой момент времени полные заряды частиц и античастиц во Вселенной равны друг другу и противоположны по знаку.

Предполагаем, что в ранней Вселенной ($T \gtrsim T_p = m_p c^2/k_B$, $m_p$ – масса протона), частицы, античастицы и излучение находились в термодинамическом равновесии (химическом и тепловом) и были равномерно перемешаны. Пространство-время было плоским. Гравитационно-нейтральная вакуумная материя была сильно сжатой, она определяла динамику расширения плоского пространства. Вещество, антивещество и излучение были «вморожены» в расширяющийся вакуум и не влияли на общую динамику Вселенной. Количество частиц, античастиц и фотонов было приблизительно одинаковым. Их параметры менялись в соответствии с изменением масштаба Вселенной.

При расширении Вселенной и её остывании происходил выход частиц и античастиц из химического равновесия. Сначала из равновесия вышли $D$ и $\overline{D}$, $\nu$ и $\overline{\nu}$, затем $p$, $\overline{p}$, $n$, $\overline{n}$, последними $e$ и $\overline{e}$.

Вследствие наличия электрических и гравитационных зарядов у частиц и античастиц происходило их пространственное разделение. Коллективное электромагнитное взаимодействие порождало мелкомасштабные неоднородности электрического заряда. Коллективное гравитационное взаимодействие

создавало неоднородности гравитационных зарядов значительно бóльших масштабов.

В процессе расширения и остывания Вселенной подавляющая часть частиц и античастиц проаннигилировала. При $T \approx 10^9$ К почти вся энергия обычной космической среды оказалась в излучении. Вселенная распалась на гравитационно заряженные области вещества и антивещества. Излучение и вакуумная материя во все эпохи распределены во Вселенной практически однородно.

**Космологические уравнения Фридмана.** В рамках гравидинамики рассмотрим динамику Вселенной. Считаем, что Вселенная однородна, изотропна и нестационарна. Учитываем, что метрику её пространства-времени в сопутствующей системе отсчёта можно записать в виде

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t)\left[d\chi^2 + f(\chi)\left(\sin^2\theta d\phi^2 + d\theta^2\right)\right], \qquad (26.14)$$

где

$$f(\chi) = \begin{cases} \chi^2, & \text{при } k = 0, \\ \sin^2\chi, & \text{при } k = 1, \\ \mathrm{sh}^2\chi, & \text{при } k = -1. \end{cases} \qquad (26.15)$$

При $k = 0$ пространство плоское, при $k = 1$ – замкнутое сферическое, а при $k = -1$ – псевдосферическое [27; 46].

С учётом (26.14) уравнения гравидинамики (26.2) стандартным образом [19; 27] преобразуем в космологические уравнения Фридмана, описывающие динамику однородной изотропной Вселенной,

$$\left(\frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{0 \cdot c^2}{a^2}\right) = \frac{8\pi G}{3}(\rho_g + \overline{\rho}_g) + \frac{\gamma^2 c^2}{a^2}, \qquad (26.16)$$

$$2\frac{\ddot{a}}{a} + \frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{0 \cdot c^2}{a^2} = \frac{\gamma^2 c^2}{a^2}. \qquad (26.17)$$

При записи этих уравнений учтено, что кроме обычной материи, Вселенную заполняет ещё и гравитационно-нейтральная вакуумная материя. Её параметры определяются формулами

$$\varepsilon_N = \frac{3c^4}{8\pi G} \cdot \frac{\gamma^2}{a^2}, \quad P_N = -\frac{1}{3}\varepsilon_N, \qquad (26.18)$$

где $\gamma$ – универсальная постоянная, значение которой может быть найдено в процессе применения теории.

На космологических масштабах Вселенная однородна и изотропна, а плотность гравитационного заряда $(\rho_g + \overline{\rho}_g) = 0$. В этом случае уравнения Фрид-

мана (26.16), (26.17) принимают вид

$$\ddot{a} = 0, \quad \dot{a}^2 = \gamma^2 c^2 . \tag{26.19}$$

Эти уравнения совпадают с космологическими уравнениями Фридмана, полученными ранее в рамках двузнаковой гравитации. Динамика однородной изотропной гравитационно-нейтральной Вселенной в двузнаковой гравитации и в гравидинамике описывается одинаково и определяется свойствами гравитационно-нейтральной вакуумной материи. Также одинаково в этих теориях описывается и распад Вселенной на миры и антимиры.

В гравидинамике космологической моделью однородной изотропной Вселенной является S-модель. Она подробно описана в гл. 17 и 18. Показано, что в рамках этой модели значительно проще и убедительнее, чем в рамках космологической модели, основанной на ОТО, интерпретируются астрономические наблюдения, для которых существенны космологические эффекты.

В гравидинамике предполагается, что гравитационный заряд фотонов равен нулю. Считается, что фотоны и антифотоны – это тождественные частицы. Полагаем, что ответ на вопрос: существуют ли в реальности антифотоны или нет, может быть найден из наблюдений. Некоторые случаи, в которых, как мы считаем, проявляется различие фотонов и антифотонов, рассмотрены в гл. 23 и 24.

В настоящей книге мы исходим из нашего ощущения о красоте и простоте теории гравитации. Полагаем, что двузнаковая гравитация с антифотонами в этом плане предпочтительнее, чем гравидинамика, и поэтому в настоящей книге она рассматривается более подробно. В то же время лишь наблюдения и эксперименты могут быть решающими в установлении истины. На настоящий момент наиболее актуальными, как мы полагаем, являются экспериментальные исследования, направленные на поиск ответа на вопрос: существуют ли антифотоны или нет?

# ГЛАВА 27

# ВАКУУМ И ГРАВИТАЦИЯ

## 27.1. Поляризация вакуума — альтернатива тёмной материи

В этой главе показано, что вследствие влияния вакуума гравитационные поля на галактических масштабах претерпевают кардинальные изменения. Предполагается, что влияние вакуума на гравитационные поля связано с его поляризацией. Гипотеза о гравитационной поляризации вакуума является естественной для двузнаковой гравитации. Она учитывает следующие фундаментальные положения этой теории:

- основной компонентой космической среды является вакуум. Он электро- и гравитационно-нейтрален;
- гравитация различает частицы и античастицы, в том числе и виртуальные. Существует регулярный механизм их разделения в гравитационном поле.

Показано, что если идея о гравитационной поляризации вакуума является правильной, то с учётом её влияния гравитация это не только всемирное тяготение, но одновременно и всемирное отталкивание.

Гипотеза о гравитационной поляризации вакуума является альтернативой гипотезе о существовании тёмной материи.

Существуют обширные наблюдательные данные о динамике галактик и их скоплений. Хорошо изучено распределение в них видимой материи: звёзд, их скоплений, газопылевых облаков, областей, заполненных горячей плазмой и многих других объектов, входящих в их состав. Считается, что динамика галактик и их скоплений главным образом зависит от гравитационного взаимодействия материи, из которой они состоят [1; 24].

Попытки в рамках существующей теории гравитации (ОТО) объяснить наблюдаемую динамику галактик и их скоплений, как обусловленную гравитационным взаимодействием лишь видимой в них материи, оказались неудачными. Существуют две альтернативные точки зрения на решение этой проблемы. Они заключаются в следующем.

- ОТО является правильной теорией даже на космологических масштабах, но видимая материя составляет лишь малую часть материи, реально существующей во Вселенной.
- ОТО является ограниченной теорией, и это явно проявляется уже на масштабах галактик и их скоплений.

Дадим краткое пояснение идей, лежащих в основе этих точек зрения.

**Идея о существовании тёмной материи**. В современной космологии преобладающей является точка зрения, согласно которой в галактиках и их скопле-

ниях, кроме видимой материи, в ещё бóльших количествах присутствует также и невидимая материя, влияние которой явно проявляется лишь в гравитации. Эту гипотетическую компоненту материи обычно называют тёмной материей. Первая работа, в которой содержалось указание на возможное присутствие во Вселенной тёмной материи, относится ещё к 1930-м гг. [106].

В дальнейшем на основе анализа наблюдательных данных, некоторые из которых схематично описаны в следующем пункте, в современной космологии сделан вывод о том, что в галактиках тёмной материи значительно больше, чем барионной материи [18; 19; 24; 70]. Наблюдательные данные показывают, что распределения тёмной и барионной материй в галактиках сильно отличаются друг от друга. В центральных областях галактик, где плотность барионной компоненты космической среды на много порядков больше, чем её среднее значение во Вселенной, тёмной материи мало. Наоборот, на периферии галактик, где барионной материи мало, тёмная материя присутствует в больших количествах. Считается, что протяжённые области, охватывающие галактики – их гало, в основном состоят из тёмной материи.

Проводился анализ наблюдательных данных о скоростях движения звёзд в галактиках, о кривых вращения галактик, о гравитационном линзировании и некоторых других. Был сделан вывод о том, что масса невидимой тёмной материи в галактиках и их скоплениях приблизительно в 5–6 раз больше, чем масса видимой материи, содержащейся в них [19; 70].

В рамках существующей теории объяснить, почему соотношение между количествами видимой и невидимой материей в галактиках, а предположительно, и во всей Вселенной является таковым и какова взаимосвязь между ними, пока не удаётся. По существу тёмная материя является гипотетической сущностью. Считается, что проблема объяснения её природы является одной из фундаментальных в современной физике [18; 19].

**Идея гравитационной поляризации вакуума**. В двузнаковой гравитации, как и в ОТО, наблюдаемое поведение гравитационного поля на периферии галактик и их скоплений можно пытаться объяснить, вводя гипотетическую тёмную материю. В ОТО это, по-видимому, единственно возможный разумный способ интерпретации наблюдений. В двузнаковой гравитации это не так. В этой теории возможно и другое, и как мы полагаем, более простое и естественное объяснение необычного поведения гравитационного поля. Оно заключается в следующем.

Согласно двузнаковой гравитации сгустки барионной компоненты космической среды (планеты, звёзды, галактики, скопления галактик и другие структуры) погружены в гравитационно-нейтральный вакуум, являющийся в этой теории главной компонентой космической среды. Гравитационные поля этих объектов по-разному действуют не только на реальные частицы и античастицы, но и на виртуальные. Вследствие этого, как мы предполагаем, гравита-

ционные поля поляризуют вакуум. Результатом этого является существенное изменение этих полей. Одним из следствий поляризации вакуума является, как будет показано, значительное отличие гравитационных полей на периферии галактик и их скоплений от рассчитываемых в рамках ОТО.

Эффект изменения гравитационного поля масс, находящихся в вакууме, за счёт его гравитационной поляризации, аналогичен эффекту изменения электрического поля заряда, помещённого в электронейтральную среду. Электрическое поле заряда поляризует эту среду, притягивая заряды противоположного знака и отталкивая одноимённые с ним заряды. Следствием этого является существенное изменение электрического поля. Вместо электрического поля

$$\phi = e/R \tag{27.1}$$

для точечного заряда $e$ в реальности имеет место поле

$$\phi = \frac{e}{R}\exp\left(-\frac{R}{d_e}\right), \tag{27.2}$$

где $d_e$ – так называемый дебаевский радиус [5].

В результате электрической поляризации нейтральной среды электрическим полем заряда имеет место его экранирование. Электрическое поле уменьшается. Характерный масштаб экранирования $d_e$ – дебаевский радиус. Он определяется параметрами среды, в которую помещён электрический заряд. Уменьшение электрического поля заряда за счёт электрической поляризации среды, в которую он помещён, является следствием того, что электромагнитное взаимодействие является двузнаковым и при этом, что важно, разноимённые электрические заряды притягиваются, а одноимённые отталкиваются.

Гравитационная и электрическая поляризации космической среды существенно отличаются друг от друга. Их различие в следующем.

Электромагнитные силы, действующие между элементарными частицами, на много порядков больше, чем гравитационные. Вследствие этого электрическая нейтральность космической среды проявляется на значительно меньших масштабах, чем гравитационная нейтральность. На атомных размерах электрической нейтральности нет, но для макроскопических тел в окружающей нас природе она выполняется с высокой точностью. В то же время в окружающем нас мире гравитационная нейтральность космической среды в явном виде не проявляется. Согласно двузнаковой гравитации это вовсе не доказывает, что в природе её нет. Это означает лишь то, что масштаб, на котором гравитационная нейтральность космической среды проявляется, является достаточно большим.

В двузнаковой гравитации, в отличие от электродинамики, одноимённые гравитационные заряды притягиваются, а разноимённые отталкиваются. Это

приводит к кардинальному различию результатов гравитационной и электрической поляризаций. В окружающем нас Мире, в отсутствие антивещества, гравитационная поляризация космической среды связана с поляризацией гравитационно-нейтрального вакуума. Вследствие этой поляризации гравитационные поля частиц приобретают сложную радиальную структуру. В п. 27.3 показано, что на расстояниях порядка и бóльших масштаба поляризации вакуума $d$ гравитационное поле точечной массы $M$ отличается от ньютоновского поля.

Вместо ньютоновского потенциала

$$\Phi_0 = -\frac{GM}{R}, \tag{27.3}$$

в реальности имеет место потенциал

$$\Phi = -\frac{GM}{R}\cos\left(\frac{R}{d}\right). \tag{27.4}$$

Вакуум является универсальной электро- и гравитационно-нейтральной квантовой средой. Он определяет значения параметров частиц и античастиц, являющихся его возмущёнными состояниями, а также значения и других физических констант. Предполагаем, что пространственный масштаб $d$, определяющий гравитационную поляризуемость вакуума, является универсальной константой.

**Замечание.** Чтобы не получить явного противоречия с наблюдениями, считаем, что масштаб $d$ соизмерим с размером Галактики. По-видимому, $d \gtrsim 10$–$30$ кпк. Учитываем, что на масштабах, заметно меньших 10 кпк, эффект «тёмной материи» практически не заметен, зато на масштабах, больших 30 кпк, он проявляется явно. Оценка величины масштаба $d$, согласующейся с этим утверждением, приведена в п. 20.4, формула (20.41). Согласно ей $d \approx 10^{24}$ см.

В следующем пункте описаны некоторые наблюдательные данные, в которых проявляется необычное поведение гравитационных полей на галактических масштабах. Оно в современной астрофизике интерпретируется как обусловленное существованием в больших количествах на периферии галактик невидимой материи, проявляющейся лишь в гравитации. В предлагаемом нами объяснении необычное поведение гравитационных полей на галактических масштабах связано с гравитационной поляризацией вакуума.

## 27.2. Тёмная материя в наблюдениях

**Равновесие скоплений галактик.** Обычно движение мелких фрагментов (карликовых галактик, облаков межгалактического газа и др.) в скоплениях галактик, изучается в предположении, что релаксационные процессы в галактиках и их скоплениях уже завершены, и они являются гравитационно связанными структурами Вселенной [1; 24].

Согласно законам механики существует определённое соотношение между полной массой гравитационно-связанных систем, в частности, галактик и их скоплений, и дисперсией скоростей составляющих их элементов. Это соотношение определяется теоремой вириала [45]

$$3\langle V^2\rangle = \frac{GM}{R_0}. \tag{27.5}$$

Использование вириальной теоремы для многочисленных элементов, составляющих галактики и их скопления, позволяет определить их общую массу. Расчёты в рамках существующей теории гравитации показывают, что с учётом измеренных характерных размеров галактик и их скоплений $R_0$, а также дисперсии лучевых скоростей $\langle V^2\rangle$ составляющих их фрагментов, вириальные значения масс галактик и их скоплений оказываются существенно превышающими массы реально наблюдаемого в них видимого вещества. Для объяснения этого факта обычно предполагают, что, кроме видимой материи, галактики и их скопления содержат значительно больше невидимой материи, и она проявляет себя лишь через гравитационное влияние на движение наблюдаемых объектов [19; 27; 70].

**Гравитационное линзирование**. Изучается искажение изображений удалённых астрономических объектов, связанное с отклонением лучей, проходящих через локальные неоднородности гравитационного поля, созданные гравитационно-связанными сгустками материи (гравитационными линзами), находящимися между наблюдателем и наблюдаемым объектом.

Чтобы в рамках ОТО интерпретировать наблюдаемые отклонения лучей, обычно считают, что видимое вещество гравитационных линз, на которых происходит преломление лучей, составляет лишь малую часть их массы. Для объяснения этих наблюдений предполагают наличие в гравитационных линзах невидимой материи в значительно бóльших количествах, чем видимой материи [19; 27; 69].

**Кривые вращения галактик.** Изучается движение звёзд, их скоплений, а также облаков газа, совершающих круговое движение в центральных областях галактик и на их периферии. В приближённых качественных расчётах считается, что галактики являются однородными сферическими шарами массы $M_0$ и радиуса $R_0$. Для кругового движения объектов в этих галактиках связь

между скоростью их кругового движения $V$ и радиусом орбит $R$ определяется формулами

$$V(R) = \sqrt{G\frac{M_0}{R_0^3}} \cdot R \text{ при } 0 \le R \le R_0; \tag{27.6}$$

$$V(R) = \sqrt{G\frac{M_0}{R}} \text{ при } R > R_0. \tag{27.7}$$

Изучение кривых вращения $V(R)$ в галактиках, которые наблюдаются как близкие к сферическим, показывает следующее. При $0 < R < R_0$ закон $V(R) \sim R$ выполняется. При $R > R_0$, там, где практически отсутствует видимая материя, оказывается справедливым закон $V(R) \simeq \text{const}$, а вовсе не $V(R) \sim R^{-1/2}$, который следовало бы ожидать [19; 24].

Чтобы объяснить наблюдаемую кривую вращения $V(R)$, обычно считают, что видимое вещество галактики погружено в сферически симметричное облако значительно большего размера, чем галактика (её гало) и оно состоит из невидимой материи, плотность которой $\rho_D$ спадает по закону $\rho_D(R) \sim R^{-2}$ ($D$ – Dark). Почему должен быть такой закон спадания плотности тёмной материи и какова её природа – остаётся загадкой.

**Тёмная материя в Солнечной системе.** Наблюдения за движениями видимых объектов в Солнечной системе показывают, что, по-видимому, нет никакой необходимости в предположении о наличии тёмной материи, по крайней мере в её центральной части (приблизительно до 20 а.е.). Все наблюдаемые движения в этой области можно объяснить, не предполагая её существования.

Особенности в наблюдаемом движении космических аппаратов (Пионер-10, 11) на расстояниях 20–60 а.е., возможно, указывают на слабое проявление эффекта тёмной материи в Солнечной системе. Утверждать, что это именно так, пока нельзя. Это связано с отсутствием надёжных данных об условиях движения объектов на периферии Солнечной системы [76].

Достоверно можно утверждать лишь следующее: там, где в Солнечной системе присутствует подавляющая часть её видимой массы (барионной компоненты), тёмной материи нет, а если она и есть, то её на много порядков меньше.

**Тёмная материя в окрестности двойных звёзд**. Наблюдательные данные показывают, что бóльшая часть звёзд во Вселенной является членами двойных систем. Детальное изучение динамики двойных звёзд показывает, что предполагать наличие в области их движения тёмной материи нет необходимости [25; 58].

**Тёмная материя и чёрные дыры**. Есть основания считать, что «обычные» чёрные дыры, не могут дать существенного вклада в общую массу материи Вселенной [19; 51]. В то же время отметим, что одним из возможных канди-

датов, составляющих тёмную материю, могут быть так называемые первичные чёрные дыры (ПЧД) [51; 89]. Идея использовать ПЧД для объяснения природы тёмной материи представляется нам весьма интересной.

**Тёмная материя внутри Галактики**. Детальное исследование движения более чем 400 звёзд на расстоянии до 13 000 световых лет от Солнца показало, что для их объяснения достаточно учитывать лишь влияние вещества, которое в галактике находится в форме звёзд, пыли и газа. На основании этих исследований авторами [78] сделан следующий вывод: «Согласно нашим вычислениям наличие тёмной материи внутри Галактики должно было отчётливо проявиться в наших измерениях, но её там просто не оказалось».

В следующих пунктах главы покажем, что приведённые выше наблюдательные данные могут быть объяснены в рамках двузнаковой гравитации без привлечения идеи о существовании тёмной материи.

## 27.3. Поле точечной массы в вакууме

Учитываем, что гравитирующие массы погружены в электро- и гравитационно-нейтральный вакуум. Он обладает определёнными физическими свойствами. Гравитационные поля масс влияют на вакуум. Происходит его поляризация, и за счёт этого гравитационные поля масс становятся кардинально другими.

Предполагаем, что в двузнаковой гравитации уравнение, описывающее слабые гравитационные поля, аналогично уравнению, описывающему электростатическое поле в однородной плазме. Это уравнение для точечного заряда, помещённого в электронейтральную плазму, дебаевский радиус которой $d_e$, имеет вид

$$\Delta\phi = -4\pi e\delta(\vec{R}) + \phi/d_e^2, \tag{27.8}$$

где $\delta(\vec{R})$ – дельта-функция Дирака [5]. Учитывая сходство и различие в характере взаимодействия электрических и гравитационных зарядов в электродинамике и двузнаковой гравитации, аналог уравнения (27.8) для гравитационного заряда точечной массы в гравитационно-нейтральном вакууме записываем в виде

$$\Delta\Phi = 4\pi GM\delta(\vec{R}) - \Phi/d^2\,, \tag{27.9}$$

где $d$ – поляризационная длина вакуума. Рассматривая свойства гравитационных полей на временах, много меньших возраста Вселенной, считаем, что $d$ является постоянной величиной.

Решение уравнения (27.9), удовлетворяющее при $R \to 0$ предельному переходу $\Phi \to \Phi_0$, описывается формулами (27.3), (27.4).

На рис. 27.1 изображены графики функций $\Phi_0(R)$ и $\Phi(R)$.

Видно, что если предлагаемая здесь идея о гравитационной поляризации вакуума является правильной, то на масштабах $R \gtrsim d$ применять закон Ньютона нельзя. Это означает, что если масштаб $d$ соизмерим с характерными размерами Галактики, то на галактических масштабах это должно проявляться в несоответствии существующей теории гравитации и наблюдений. Как показано в п. 27.2, это и имеет место в реальности.

Далее приведено решение уравнения (27.9) для гравитационного поля, однородного шара с учётом поляризации вакуума.

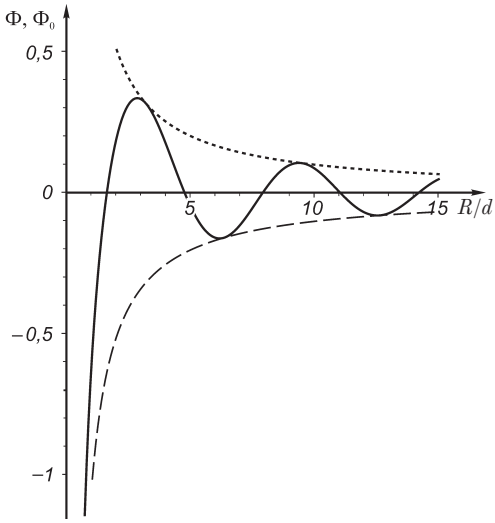



*Рис. 27.1. Графики функций $\Phi_0(R)$ – пунктирная и $\Phi(R)$ – сплошная линии*

## 27.4. Поле однородного шара

**Поле на оси кольца, надетого на шар радиуса $R_0$.** Учитывая линейность уравнения (27.9), а также его решение для точечной массы (27.4), легко показать, что поле на оси кольца, надетого на поверхность шара радиуса $R_0$, на расстоянии $R$ от центра шара, определяется формулой

$$\Phi_k = -\frac{2\pi G R_0 \sigma}{R} \cos\left(\frac{r_1}{d}\right) dr_1 , \qquad (27.10)$$

где $\sigma$ – поверхностная плотность массы кольца, а

$$r_1^2 = R_0^2 + R^2 - 2R_0 R \cos(\Theta). \qquad (27.11)$$

Площадь кольца

$$S_k = 2\pi R_0^2 \sin(\Theta) d\Theta . \qquad (27.12)$$

**Поле сферического слоя радиуса $R_0$.** Используя формулу (27.10) и производя суммирование по всем кольцам сферы радиуса $R_0$, находим гравитационное поле, создаваемое ею внутри и вне её. Соответствующие формулы, описывающие распределение потенциала, имеют вид

$$\Phi(R \le R_0) = -\frac{4\pi G R_0 \sigma d}{R} \cos\frac{R_0}{d} \sin\frac{R}{d}, \tag{27.13}$$

$$\Phi(R \ge R_0) = -\frac{4\pi G R_0 \sigma d}{R} \sin\frac{R_0}{d} \cos\frac{R}{d}. \tag{27.14}$$

Поле сферы, описываемое этими формулами, в предельном случае $d \to \infty$, переходит в ньютоновское. В ньютоновском пределе поле внутри сферы отсутствует, а вне сферы оно такое, как поле точечной массы, равной массе сферы, помещённой в её центр.

Из (27.13), (27.14) видно, что при $R_0 \gtrsim d$ гравитационное поле сферы кардинально отличается от предсказываемого ньютоновской теорией. Например, при $R_0 = n\pi d$, где $n = 1, 2, \ldots$ поле отсутствует вне сферы и сосредоточено внутри неё. В то же время при $R_0 = (n + 1/2)\pi d$ поле внутри сферы отсутствует и существует лишь вне её.

Из (27.13), (27.14) видно, что гравитационное поле сферы, с учётом влияния поляризации вакуума, может быть не только полем притяжения, но и полем отталкивания.

**Поле однородного шара радиуса $R_0$.** Используя формулы (27.13), (27.14) и производя суммирование по всем сферическим слоям шара, находим гравитационное поле однородного шара внутри и вне его. Формулы, описывающие это поле для шара массы $M$ и радиуса $R_0$, с учётом влияния поляризации вакуума, имеют вид

$$\bar{\Phi}(0 \le x \le x_0) = -\frac{3}{x_0^2}\left[\left(\cos x_0 + x_0 \sin x_0\right)\frac{\sin x}{x} - 1\right], \tag{27.15}$$

$$\bar{\Phi}(x \ge x_0) = -\frac{3}{x_0^2}\left[\left(\sin x_0 - x_0 \cos x_0\right)\frac{\cos x}{x}\right]. \tag{27.16}$$

Использованы обозначения

$$\bar{\Phi} = \Phi/(GM/R_0),\ \ x_0 = R_0/d,\ \ x = R/d. \tag{27.17}$$

В предельном случае $d \to \infty$, формулы (27.15), (27.16) приводятся к виду:

$$\bar{\Phi}_0(0 \le x \le x_0) = -\frac{3}{2} + \frac{1}{2}\cdot\frac{x^2}{x_0^2}, \tag{27.18}$$

$$\bar{\Phi}_0(x \ge x_0) = -\frac{x_0}{x}. \tag{27.19}$$

Они описывают поле шара в ньютоновском приближении.

Если предлагаемая нами феноменологическая модель поляризации вакуума в гравитационном поле верна, то согласно формулам (27.15), (27.16), гравитационное поле однородного шара в двузнаковой гравитации кардинально отличается от соответствующего поля, рассчитываемого в ньютоновском приближении по формулам (27.18), (27.19)

Влияние гравитационной поляризации вакуума на гравитационные поля является существенным для тел, имеющих размеры $R_0$, соизмеримые с масштабом поляризации $d$.

На рис. 27.2 и 27.3 приведены графики функций $\bar{\Phi}(x)$ и $\bar{\Phi}_0(x)$, а также их производных для некоторых характерных значений параметра $x_0$. Производные взяты со знаком минус. Они описывают ускорение свободного падения пробных частиц в поле шара. Если величина ускорения $-\bar{\Phi}'(x)$ отрицательна, то это означает притяжение частиц к центру шара, и, наоборот, там, где $-\bar{\Phi}'(x) > 0$ имеет место, их отталкивание от шара.

Цель размещения графиков – наглядно показать принципиальное отличие предлагаемой теории гравитации от ньютоновской.

Поле однородного шара в ньютоновской теории всегда является полем притяжения. Ускорение свободного падения во всех случаях направлено к центру шара ($-\bar{\Phi}_0'(x)$ при любых $x$ имеет отрицательное значение). Величина этого ускорения максимальна на поверхности шара. При $x \leqslant x_0$ ускорение линейно растёт от нуля в центре шара до максимального значения при $x = x_0$, затем с ростом $x$ имеет место его убывание, обратно пропорциональное квадрату расстояния до центра ($\sim x^{-2}$), рис 27.3.

Поле однородного шара с учётом поляризации вакуума имеет более сложную радиальную структуру, чем соответствующее ньютоновское поле. Оно содержит не только потенциальные ямы, но и потенциальные бугры (см. рис. 27.2). Есть области, где частицы не притягиваются, а отталкиваются от шара. В этих областях производная $-\bar{\Phi}'(x) > 0$. В то же время одновременно существуют и области, где, как и в ньютоновской теории, $-\bar{\Phi}'(x) < 0$ и имеет место притяжение частиц к центру шара.

При $x_0 \leqslant 2$ гравитационное поле $\bar{\Phi}(x)$ внутри шара мало отличается от поля $\bar{\Phi}_0(x)$. Различие напряжённостей полей в этих случаях не превышает 20 %. В то же время при увеличении параметра $x_0$ от 2 до 2,8 различие полей $\bar{\Phi}(x)$ и $\bar{\Phi}_0(x)$ становится кардинальным. При $x_0 = 2{,}8$ поле внутри шара, согласно предлагаемой теории, оказывается равным нулю. В области значений параметра $2{,}8 \leqslant x_0 \leqslant 4{,}5$ поле внутри шара является не полем притяжения, а полем отталкивания. При дальнейшем росте параметра $x_0$, до $x_0 \simeq 6{,}12$ поле внутри шара, за исключением его периферии, является полем отталкивания. При $x_0 \simeq 6{,}12$ поле внутри шара отсутствует (см. рис. 27.3).

Поля $\bar{\Phi}(x)$ и $\bar{\Phi}_0(x)$ существенно отличаются друг от друга внутри шара и при значениях $x_0$ значительно бóльших, чем 6,12. В отличие от ньютонов-

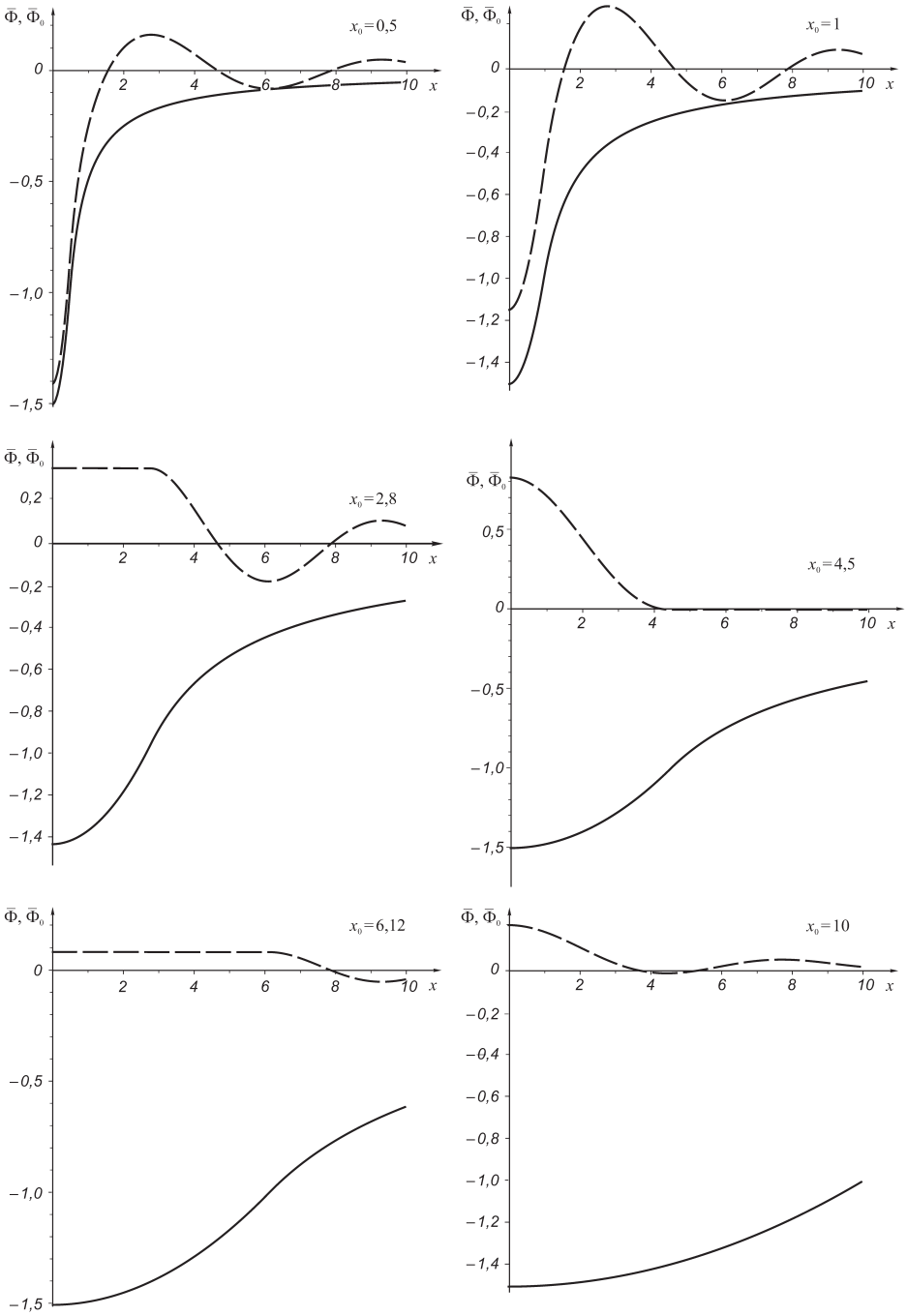



*Рис. 27.2. Графики функций $\bar{\Phi}(x)$ и $\bar{\Phi}_0(x)$ для некоторых значений параметра $x_0$. Штриховые линии – графики функции $\bar{\Phi}(x)$; сплошные линии – графики функции $\bar{\Phi}_0(x)$*

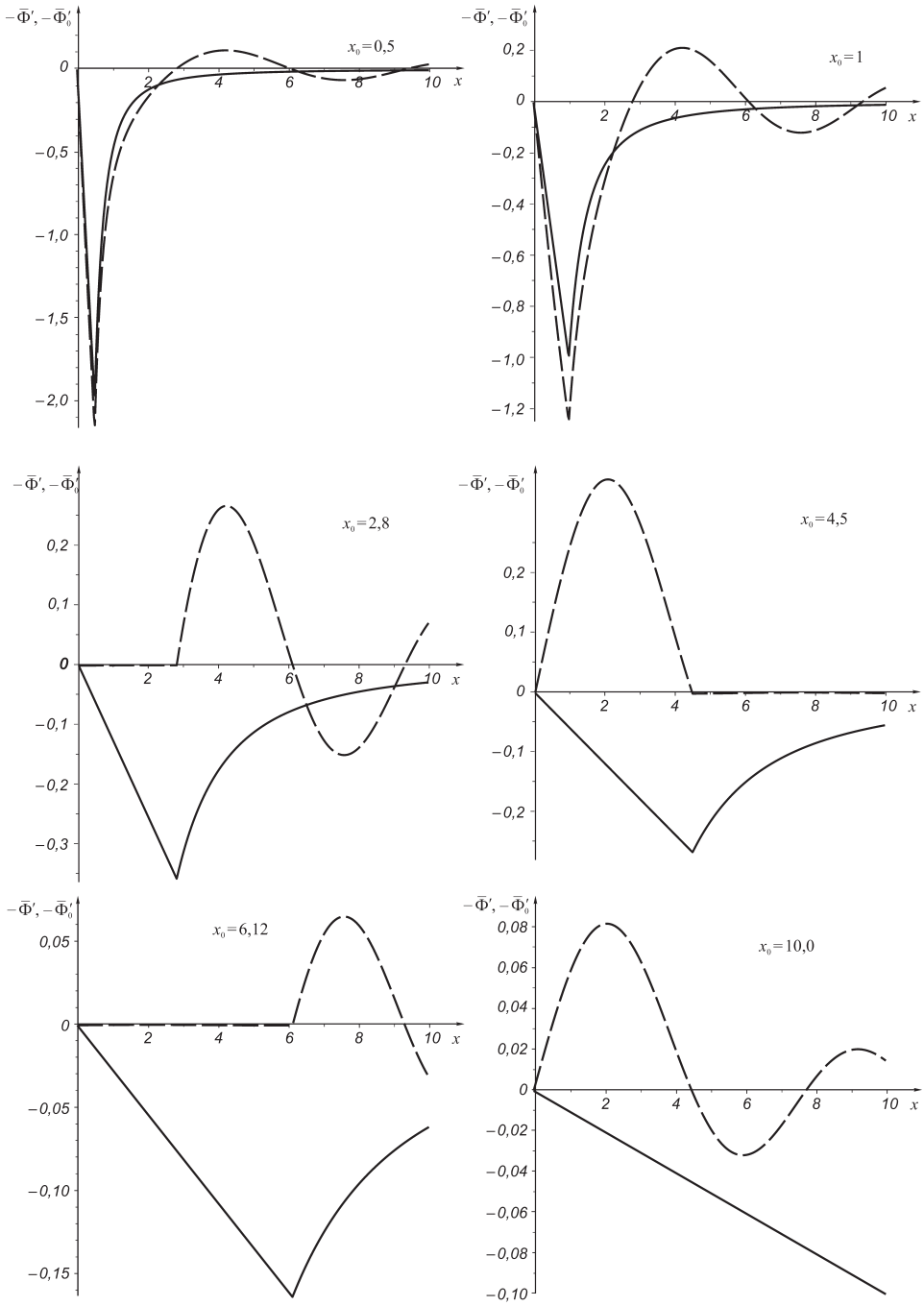



*Рис. 27.3. Графики функций $-\bar{\Phi}'_0(x)$ (сплошные линии) и $-\bar{\Phi}'(x)$ (штриховые линии), описывающие распределение ускорения свободного падения частиц в поле однородного шара радиуса $x_0$*

ской теории, в которой при $x_0 \to \infty$ напряжённость поля на поверхности шара стремится к бесконечности, этой расходимости в предлагаемой теории нет. Согласно этой теории при $x_0 \to \infty$ поле внутри шара обращается в ноль. Это означает, что в гравитации, учитывающей поляризацию вакуума, в отличие от ньютоновской теории, использование модели однородного шара в космологии не приведёт к внутренним противоречиям.

Влияние вакуума на гравитационные поля кардинально изменяет их свойства. Они приобретают новое качество. Гравитационные поля оказываются не только полями тяготения, но одновременно и полями отталкивания.

Наличие в гравитационном поле сгустков материи областей, где частицы не притягиваются к их центрам, а отталкиваются, может быть существенным фактором в образовании структур во Вселенной. Например, согласно предлагаемой теории сгустков материи, радиусы которых $2{,}8 \leqslant x_0 \leqslant 4{,}5$, не должно существовать, поскольку внутри них должны были бы действовать не силы притяжения, а силы отталкивания (см. рис. 27.3). Предлагаемая теория в отличие от ньютоновской содержит в себе не только механизм образования сгустков материи, но и механизм образования областей, из которых материя вытесняется. Можно предполагать, что галактики и их скопления – это сгустки материи, размеры которых $R_0 \leqslant 2{,}8d$, а характерные размеры пустот (войдов) $R_0 \geqslant (2{,}8\text{–}6)d$.

## 27.5. Поляризация вакуума и наблюдения

**Поляризационная длина вакуума.** Чтобы не получить противоречия с наблюдениями, необходимо предполагать, что масштаб гравитационной поляризации вакуума $d$ является достаточно большим. Следует считать, что он соизмерим с размерами Галактики. В этом случае можно объяснить, почему влияние поляризации вакуума на гравитационные поля является пренебрежимо малым во внутренних областях галактик, но зато сильно проявляется на их периферии.

В п. 27.4 на модельном примере показано, что влияние поляризации вакуума на гравитационное поле однородных шаров, имеющих радиус $R_0 \ll d$, при $R \ll R_0$ и $R \geqslant R_0$ является пренебрежимо малым. В этом случае гравитационные поля внутри шаров и в их окрестности, рассчитываемые в рамках ньютоновской теории гравитации и теории гравитации, учитывающей поляризацию вакуума, практически совпадают.

В то же время влияние поляризации вакуума на гравитационные поля шаров, имеющих радиус $R_0 \geqslant d$, приводит к сильному изменению этих полей. Согласно предлагаемой теории, при $R_0 \geqslant d$, в области $R \leqslant R_0$ и $R \geqslant R_0$, гравитационные поля могут кардинально отличаться от рассчитываемых в рамках ньютоновской теории. Учитывая это можно сделать следующий вывод.

Если идея о поляризации вакуума является правильной, а масштаб поляризации соизмерим с размером типичных галактик, то есть основание считать, что ньютоновская теория тяготения на галактических масштабах не является правильной. Наблюдаемое поведение гравитационных полей на периферии галактик и их скоплений следует связать не с наличием больших количеств тёмной материи, а с сильным отличием этих полей от рассчитываемых в рамках ньютоновской теории гравитации.

**О проблеме вириальной массы.** Решение проблемы соответствия вириальных и реально наблюдаемых масс галактик и их скоплений в рамках теории гравитации, учитывающей поляризацию вакуума, как мы предполагаем, заключается в следующем.

Необходимо учитывать, что гравитационное поле в галактиках и их скоплениях кардинально отличается от рассчитываемого в рамках ньютоновской теории тяготения. Для этих объектов теорему вириала записывать в виде (27.5) неправильно. Формула (27.5) записана для однородного шара радиуса $R_0$ в предположении квадратичности потенциала $\Phi_0(R)$ при $R \leqslant R_0$. Полагаем, что при применении этой формулы даже для качественной оценки вириальных масс галактик и их скоплений делается две ошибки.

1. Модель однородного шара плохо отражает реальное распределение материи в типичных галактиках и их скоплениях.

2. Распределение гравитационного поля на галактических масштабах существенно другое, чем это следует из ньютоновской теории тяготения.

**О кривых вращения однородного шара**. Во внутренней области шара радиуса $R_0$ гравитационное поле, при $R_0 \leqslant d$ мало отличается от ньютоновского. В этой области зависимость скорости кругового движения частиц от расстояния от центра шара является линейной.

Ситуация становится принципиально другой при $R \geqslant d$. Здесь вследствие поляризации вакуума гравитационное поле сильно отличается от ньютоновского. На рис. 27.4 приведены графики функции

$$\bar{V}(x) = \left( x \left| \frac{d\bar{\Phi}}{dx} \right| \right)^{1/2}, \qquad (27.20)$$

где $\bar{V}(x) = V_\varphi(x)/V_0$, $V_0^2 = GM/R_0$, $V_\varphi$ – тангенциальная скорость вращения частиц в поле $\Phi(x)$, для нескольких типичных значений параметра $x_0 = R_0/d$.

Приведённые графики наглядно показывают, что при $R_0 \geqslant d$ кривые вращения в области $R \geqslant R_0$ кардинально отличаются от кривых, рассчитанных в рамках ньютоновской теории тяготения.

**Гравитационное линзирование и длина поляризации вакуума**. Вследствие влияния поляризации вакуума поля гравитационных линз, рассчитываемых в

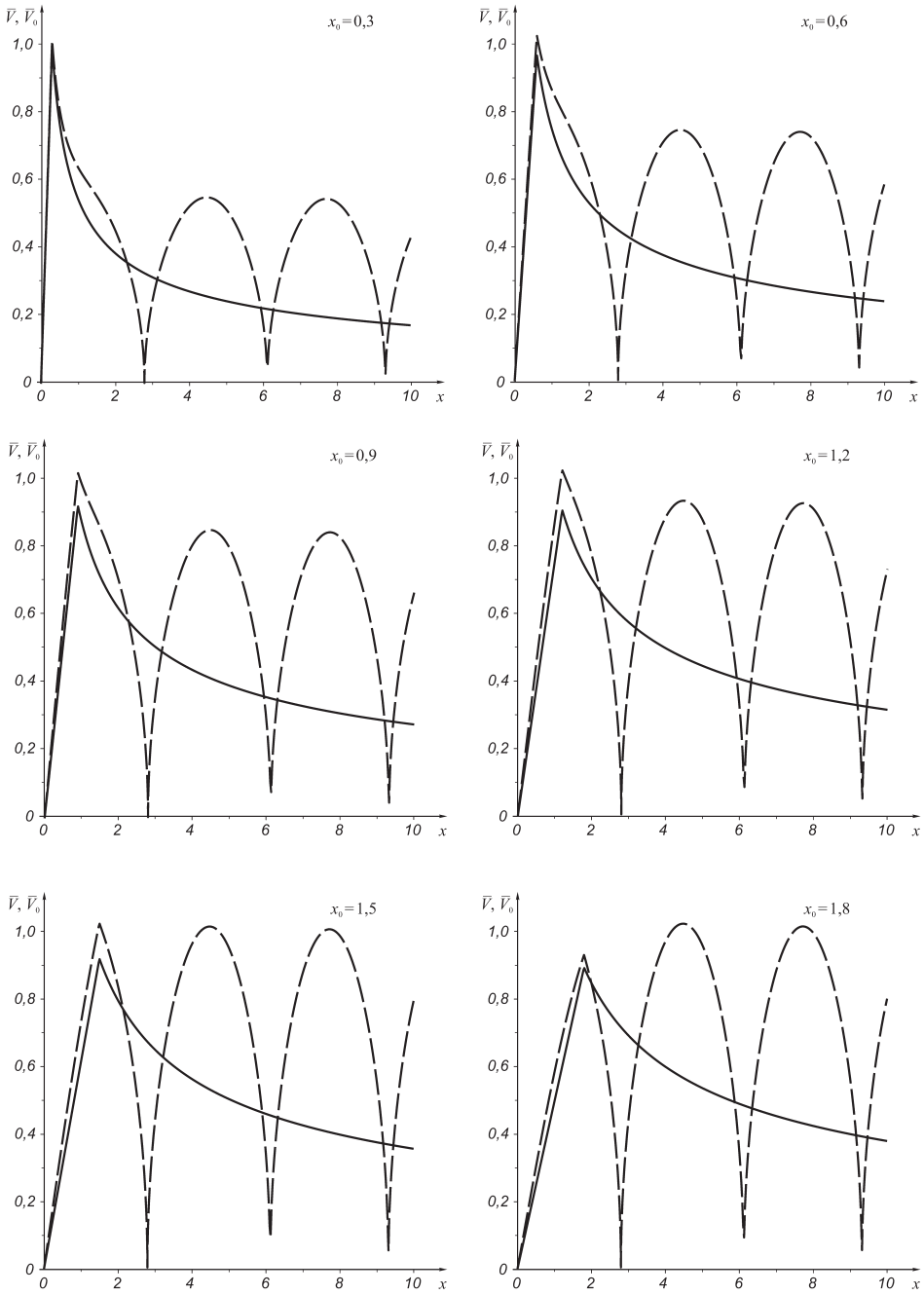



*Рис. 27.4. Графики функций $\overline{V}(x)$ и $\overline{V}_0(x)$, определяющих кривые вращения для однородных шаров, имеющих различные значения параметра $x_0 = R_0/d$. Сплошные линии – кривые вращения в ньютоновском приближении*

рамках предлагаемой теории, могут существенно отличаться от определяемых в рамках ньютоновской теории тяготения. Поля гравитационных линз на некоторых расстояниях от их центров являются полями притяжения для фотонов, а на некоторых – полями отталкивания. Характерный радиальный размер областей притяжения и отталкивания $\sim\pi d$, где $d$ – поляризационная длина вакуума. Наличие в радиальной зависимости гравитационных полей сферических линз радиуса $R_0$ множителей вида $\cos(R_0/d)$ должно проявляться в наблюдениях. После прохождения через такую гравитационную линзу плоскопараллельного светового потока в нём должны возникать кольцевые структуры. Зная расстояние $R$ до гравитационных линз и измеряя угол $\theta$, под которым видно расстояние между двумя соседними кольцами ($\approx\pi d$), можно из наблюдений определить поляризационную длину вакуума $d$. При $\theta \ll 1$ $d \approx R\theta$.

Картина прохождения электромагнитного излучения через гравитационные линзы значительно усложняется, если справедлива гипотеза о существовании антифотонов. Одно и то же гравитационное поле фотоны и антифотоны воспринимают по-разному. Каждое из наблюдаемых колец должно быть расщеплено на два.

Идея объяснения наблюдаемого поведения гравитационных полей на галактических масштабах, основанная на предположении о существенном влиянии на них гравитационной поляризации вакуума, является альтернативой гипотезе о существовании тёмной материи.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

*Этого не может быть,*
*потому что этого не может быть никогда.*
**А. П. Чехов. «Письмо к учёному соседу»**

В настоящее время очевидно, что подавляющая часть физического сообщества идею о различии в гравитации частиц и античастиц воспримет отрицательно. Предлагаемая авторами двузнаковая гравитация слишком сильно меняет существующие представления об энергии, о пространстве-времени, о составе космической среды и динамике Вселенной и о многом другом. Приведённый эпиграф – это не утверждение о некомпетентности большинства, а скорее ожидаемая реакция «здравого смысла».

Гипотеза о неразличии частиц и античастиц в гравитации, лежащая в основе ОТО, требует тщательной проверки. Авторы показывают, что альтернативная гипотеза в теоретическом плане обладает явным преимуществом. Зачем нарушать симметрию физической теории, если можно обойтись без этого? Согласно двузнаковой гравитации Вселенная не только электро-, но и гравитационно-нейтральна, а гравитация, как и другие фундаментальные взаимодействия, различает частицы и античастицы и является материальной по своей природе. Главной компонентой космической среды является физический вакуум квантовой теории. Он однородно заполняет Вселенную. Частицы и античастицы являются возбуждёнными состояниями вакуума. Частицы — состояниями с положительной энергией, а античастицы — состояниями с отрицательной энергией. Между ними существует антитяготение. В двузнаковой гравитации энергия и гравитационный заряд являются тождественными понятиями. Показано, что в рамках этой теории наблюдаемая динамика Вселенной объясняется значительно проще и убедительнее, чем в рамках общей теории относительности.

Описаны астрономические наблюдения, которые интерпретированы как доказательство существования антитяготения между частицами и античастицами. Простота и естественность предлагаемых в рамках двузнаковой гравитации решений «трудных» для ОТО проблем вдохновляют и являются основанием для вдумчивого и серьёзного её изучения и дальнейшего развития.

Если наличие антитяготения между частицами и античастицами будет убедительно доказано, то это повлечёт за собой пересмотр существующих представлений о барионной асимметрии, о динамике Вселенной и зарождении в ней структур, о динамике космической среды в окрестности релятивистских объектов и проблеме сингулярностей в гравитации, а также ряда других. Физика гравитации станет красивее и богаче по содержанию.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. Агекян, Т. А. Звёзды, галактики. Метагалактика / Т. А. Агекян. М. : Наука, 1970. 416 с.

2. Альвен, Г. Миры и антимиры. Космология и антиматерия / Г. Альвен. М. : Мир, 1968. 120 с.

3. Аптекарь, Р. Л. Исследования космических гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров в экспериментах ФТИ «Конус» / Р. Л. Аптекарь, С. В. Голенецкий, Е. П. Мазец и др. // Успехи физ. наук. 2010. Т. 180, вып. 4. С. 420–424.

4. Арцимович, Л. А. Управляемые термоядерные реакции / Л. А. Арцимович. М. : Физматгиз, 1963. 468 с.

5. Арцимович, Л. А. Физика плазмы для физиков / Л. А. Арцимович, Р. З. Сагдеев. М. : Атомиздат, 1970. 317 с.

6. Бараш, Ю. С. Электромагнитные флуктуации в веществе и молекулярные (вандерваальсовы) силы между телами / Ю. С. Бараш, В. Л. Гинзбург // Успехи физ. наук. 1971. Т. 116, вып. 1. С. 5–40.

7. Бергман, П. Загадка гравитации / П. Бергман. М. : Мир, 1969. 216 с.

8. Бисекало, Д. В. Газодинамика тесных двойных звёзд / Д. В. Бисекало, А. Г. Жилкин, А. А. Боярчук. М. : Физматгиз, 2013. 632 с.

9. Богомазов, А. И. Эволюция тесных двойных систем и гамма-всплески / А. И. Богомазов, В. М. Липунов, А. В. Тутуков // Астрон. журн. 2007. Т. 84, № 4. С. 345–356.

10. Брагинский, В. Б. Эквивалентность инертной и гравитационной масс / В. Б. Брагинский, В. И. Панов // Успехи физ. наук. 1971. Т. 105, вып. 4. С. 779–780.

11. Вайнберг, С. Гравитация и космология / С. Вайнберг. М. : Платон, 2000. 696 с.

12. Вайнберг, С. Первые три минуты / С. Вайнберг. М. : Энергоиздат, 1981. 209 с.

13. Вайскопф, В. Физика в двадцатом столетии / В. Вайскопф. М. : Атомиздат, 1977. 272 с.

14. Владимиров, Ю. С. Геометрофизика / Ю. С. Владимиров. М. : Бином, Лаборатория знаний, 2010. 536 с.

15. Владимиров, Ю. С. Пространство-время: явные и скрытые размерности / Ю. С. Владимиров. М. : Либроком, 2010. 208 с.

16. Герштейн, С. С. Осцилляционная структура гамма-всплесков и их возможное происхождение / С. С. Герштейн // Письма в Астроном. журн. 2000. Т. 26, № 11. С. 848–854.

17. Глинер, Э. Б. Раздувающаяся Вселенная и вакуумоподобное состояние физической среды / Э. Б. Глинер // Успехи физ. наук. 2002. Т. 172, № 2. С. 221–228.

18. Горбунов, Д. С. Введение в теорию ранней Вселенной. Космологические возмущения. Инфляционная теория / Д. С. Горбунов, В. А. Рубаков. М. : Красанд, 2010. 568 с.

19. Горбунов, Д. С. Введение в теорию ранней Вселенной. Теория горячего большого взрыва / Д. С. Горбунов, В. А. Рубаков. М. : ЛКИ, 2008. 552 с.

20. Де Витт, Б. Общая теория относительности / Б. Де Витт. М. : Мир, 1983.

21. Дирак, П. А. М. Принципы квантовой механики / П. А. М. Дирак. М. : Наука, 1979. 480 с.

22. Докучаев, В. И. Сверхновые – оптические предшественники коротких гамма-всплесков / В. И. Докучаев, Ю. Н. Ерошенко // Письма в Астрон. журн. 2011. Т. 37, № 2. С. 102–109.

23. Жилкин, А. Г. Динамика двумерных сферических миров / А. Г. Жилкин, В. А. Клименко, А. М. Фридман // Вестн. Челяб. гос. ун-та. 2013. № 19 (310). Физика. Вып. 17. С. 12–28.

24. Засов, А. В. Общая астрофизика / А. В. Засов, К. А. Постнов. Фрязино : Век 2, 2006. 496 с.

25. Звёзды / ред.-сост. : В. Г. Сурдин. 2-е изд., испр. и доп. М. : Физматлит, 2009. 428 с.

26. Зельдович, Я. Б. Космологическая постоянная и теория элементарных частиц / Я. Б. Зельдович // Успехи физ. наук. 1968. Т. 95, вып. 1. С. 209–230.

27. Зельдович, Я. Б. Строение и эволюция Вселенной / Я. Б. Зельдович, И. Д. Новиков. М. : Наука, 1975. 736 с.

28. Зельдович, Я. Б. Теория вакуума, быть может, решает задачу космологии / Я. Б. Зельдович // Успехи физ. наук. 1981. Т. 133, вып. 3. С. 479–503.

29. Зельдович, Я. Б. Теория тяготения и эволюция звёзд / Я. Б. Зельдович, И. Д. Новиков. М. : Наука, 1971. 486 с.

30. Каплан, С. А. Физика звёзд / С. А. Каплан. М. : Наука, 1977. 207 с.

31. Киттель, Ч. Статистическая термодинамика / Ч. Киттель. М. : Наука, 1977. 336 с.

32. Клименко, А. В. Вакуум и анизотропия параметров частиц и античастиц / А. В. Клименко, В. А. Клименко // Вестн. Челяб. гос. ун-та. 2015. № 22 (377). Физика. Вып. 21. С. 155–162.

33. Клименко, А. В. Вакуум и гравитация / А. В. Клименко, В. А. Клименко // Челяб. физ.-мат. журн. 2016. Т. 1, вып. 2. С. 100–116.

34. Клименко, А. В. Вакуумные формы материи / А. В. Клименко, В. А. Клименко // Вестн. Челяб. гос. ун-та. 2013. № 19 (310). Физика. Вып. 17. С. 72–77.

35. Клименко, А. В. Гамма-всплески. Антитяготение / А. В. Клименко, В. А. Клименко // Челяб. физ.-мат. журн. 2016. Т. 1, вып. 4. С. 94–101.

36. Клименко, А. В. Геометрические свойства однородного изотропного вакуума / А. В. Клименко, В. А. Клименко // Вестн. Челяб. гос. ун-та. 2013. № 19 (310). Физика. Вып. 17. С. 66–71.

37. Клименко, А. В. Гравитационное расщепление спектральных линий / А. В. Клименко // Вестн. Челяб. гос. ун-та. 2015. № 22 (377). Физика. Вып. 21. С. 163–170.

38. Клименко, А. В. Миры и антимиры / А. В. Клименко, В. А. Клименко // Вестн. Челяб. гос. ун-та. 2013. № 19 (310). Физика. Вып. 17. С. 100–109.

39. Клименко, А. В. О равномерном расширении Вселенной / А. В. Клименко, В. А. Клименко, А. М. Фридман // Астрон. журн. 2010. Т. 87, № 10. С. 947–966.

40. Клименко, А. В. О тепловой природе космологических сил отталкивания / А. В. Клименко, В. А. Клименко, А. М. Фридман // Вестн. Челяб. гос. ун-та. 2013. № 19 (310). Физика. Вып. 17. С. 29–43.

41. Клименко, А. В. Различает ли гравитация фотоны различных спиральностей? / А. В. Клименко, В. А. Клименко // Вестн. Челяб. гос. ун-та. 2015. № 22 (377). Физика. Вып. 21. С. 148–154.

42. Клименко, А. В. Частицы, античастицы и гравитация. Антитяготение / А. В. Клименко, В. А. Клименко // Вестн. Челяб. гос. ун-та. 2013. № 19 (310). Физика. Вып. 17. С. 78–88.

43. Клименко, А. В. Частицы, античастицы и гравитация. Гравитационно-нейтральная Вселенная / А. В. Клименко, В. А. Клименко // Вестн. Челяб. гос. ун-та. 2013. № 19 (310). Физика. Вып. 17. С. 89–99.

44. Константинов, Б. П. О возможной антивещественной природе микрометеоров. / Б. П. Константинов, М. М. Бредов, А. И. Белявский, И. А. Соколов // Космич. исслед. 1966. № 4. С. 66–73.

45. Ландау, Л. Д. Механика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М. : Наука, 1988. 204 с.

46. Ландау, Л. Д. Теория поля / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М. : Наука, 1988. 512 с.

47. Лифшиц, Е. М. О гравитационной устойчивости изотропного мира / Е. М. Лифшиц // Журн. эксперимент. и теорет. физики. 1946. Т. 16. С. 587–602.

48. Лифшиц, Е. М. Проблемы релятивистской космологии / Е. М. Лифшиц, И. М. Халатников // Успехи физ. наук. 1963. Т. 80, вып. 3. С. 391–438.

49. Матвеев, А. Н. Оптика / А. Н. Матвеев. М. : Высш. шк., 1985. 351 с.

50. Мизнер, Ч. Гравитация : в 3 т. / Ч. Мизнер, К. Торн, Д. Уиллер. М. : Мир, 1977.

51. Новиков, И. Д. Физика чёрных дыр / И. Д. Новиков, В. П. Фролов. М. : Наука, 1986. 328 с.

52. Озерной, Л. М. «Фотонные вихри» в горячей Вселенной / Л. М. Озерной, А. Д. Чернин // Письма в Журн. эксперимент. и теорет. физики. 1968. Т. 7, № 11. С. 436–439.

53. Окунь, Л. Б. Физика элементарных частиц / Л. Б. Окунь. М. : Наука, 1988. 272 с.

54. Постнов, К. А. Гиперновые и гамма-всплески / К. А. Постнов // Сорос. образоват. журн. «Физика». 2004. Т. 8, № 2. С. 69–76.

55. Постнов, К. А. Космические гамма-всплески / К. А. Постнов // Успехи физ. наук. 1999. Т. 169, вып. 5. С. 545–548.

56. Постнов, К. А. Лекции по общей астрофизике для физиков [Электронный ресурс] / К. А. Постнов. URL: http://www.astronet.ru/db/msg/1170612

57. Рубаков, В. А. Электрослабое несохранение барионного числа в ранней Вселенной и в столкновениях частиц при высоких энергиях / В. А. Рубаков, М. Е. Шапошников // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166, вып 5. С. 493–537.

58. Свечников, М. А. Каталог приближённых фотометрических и абсолютных элементов затменных переменных звёзд / М. А. Свечников, Э. Ф. Кузнецова. Свердловск : Изд-во Урал. ун-та, 1990. 229 с.

59. Смут, Дж. Анизотропия реликтового излучения. Открытие и научное знание / Дж. Смут // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 12. С. 1294–1317.

60. Стритер, Р. PCT, спин, статистика и всё такое / Р. Стритер, А. Вайтман // М. : Наука, 1966. 252 с.

61. Тейлор, Р. Строение и эволюция звёзд / Р. Тейлор. М. : Мир, 1973. 280 с.

62. Томилин, К. А. Большие числа и гипотеза о зависимости от времени мировых констант / К. А. Томилин // Исследования по истории физики и механики, 1995–1997. М. : Наука, 1999. С. 141–159.

63. Торн, К. Чёрные дыры и складки времени / К. Торн. М. : Физматлит, 2007. 616 с.

64. Фабрика, С. Н. Струи и сверхкритический аккреционный диск объекта SS433 [Электронный ресурс] / С. Н. Фабрика // Astronet. URL: http: www.astronet.ru/db/msg/1223965/index.html

65. Фейнман, Р. Квантовая электродинамика / Р. Фейнман. М. : Мир, 1964. 219 с.

66. Фок, В. А. Теория пространства, времени и тяготения / В. А. Фок. 3-е изд. М. : Изд-во ЛКИ, 2007.

67. Фридман, А. А. О кривизне пространства // Успехи физ. наук. 1963. Т. 80, вып. 3. С. 439–446.

68. Черепащук, А. М. Современная космология – наука об эволюции Вселенной / А. М. Черепащук, А. Д. Чернин // Бюлл. РАН «В защиту науки». 2008. № 4. С. 177–210.

69. Черепащук, А. М. Тесные двойные звёзды : монография : в 2 ч. / А. М. Черепащук. М. : Физматлит, 2013. Ч. 1. 560 с.; Ч. 2. 571 с.

70. Чернин, А. Д. Тёмная энергия и всемирное антитяготение / А. Д. Чернин // Успехи физ. наук. 2008. Т. 178, вып. 3. С. 267–300.

71. Широков, Ю. М. Ядерная физика / Ю. М. Широков, Н. П. Юдин. М. : Наука, 1980. 728 с.

72. Шкловский, И. С. Звёзды: их рождение, жизнь и смерть / И. С. Шкловский. 3-е изд., перераб. М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. 384 с.

73. Эйнштейн, А. Вопросы космологии и общая теория относительности / А. Эйнштейн // Собрание научных трудов : в 4 т. Т. I : Работы по теории относительности 1905–1920 гг. М. : Наука, 1965. С. 601–612.

74. Эйнштейн, А. Основы общей теории относительности / А. Эйнштейн // Собрание научных трудов : в 4 т. Т. I : Работы по теории относительности 1905–1920 гг. М. : Наука, 1965. С. 452–504.

75. Эйнштейн, А. Эфир и теория относительности / А. Эйнштейн // Собрание научных трудов : в 4 т. Т. I : Работы по теории относительности 1905–1920 гг. М. : Наука, 1965. С. 682–689.

76. Anderson, D. The Strange Acceleration of Pioneer 10 and 11 / D. Anderson // The Planetary Report. 2001. Vol. XXI, № 6.

77. Astier, P. The Supernova Legacy Survey: measurement of $\Omega_M$, $\Omega_\Lambda$ and $w$ from the first year data set / P. Astier, J. Guy, N. Regnault et al. // Astron. and Astrophys. 2006. Vol. 447, № 1. P. 31–48.

78. Bidin, M. C. Kinematical and Chemical Vertical Structure of the Galactic thick disk H. A. Lack of the Dark Matter in the Solar Neighborhood / C. Moni Bidin et al. // The Astrophys. J. Vol. 751, № 1. P. 14.

79. Blinnikov, S. Exploding Neutron Stars in Close Binaries / S. Blinnikov, I. D. Novikov et al. // Soviet Astron. Lett. 1984. Vol. 10. P. 177–179.

80. Bonnor, W. B. Jeans' Formula for Gravitational Instability / W. B. Bonnor // Mon. Not. R. Astr. Soc. 1957. Vol. 117. P. 104–117.

81. Charman, A. E. Description and First Application of a New Technique to Measure the Gravitational Mass of Antihydrogen [Электронный ресурс] / The ALPHA Collaboration & A. E. Charman // Nature Communications. 2013. № 4. P. 1785. URL: http://www.nature.com/ncomms/journal/v4/n4/full/ncomms2787.html

82. Cohen, A. C. A Matter–Antimatter Universe? / A. C. Cohen, A. D. Rujula, S. L. Glashow // Astrophys. J. 1998. Vol. 495, no. 2. P. 539–549.

83. Costa, E. Discovery of an X-ray Afterglow Associated with the γ-ray Burst of 28 February 1997 / E. Costa, F. Frontera, J. Heise et al. // Nature. 1997. Vol. 387. P. 783–785.

84. Dirac, P. A. M. The Cosmological Constants / P. A. Dirac // Nature. 1937. Vol. 139, № 3612. P. 323 ; рус. перевод: Дирак, П. А. М. Космологические постоянные / П. А. М. Дирак // Альберт Эйнштейн и теория гравитации : сб. ст. М. : Мир, 1979. С. 538–539.

85. Fabian, A. C. SS433 – a Double Jet in Action? / A. C. Fabian, M. J. Rees // Mon. Not. R. Astr. Soc. 1979. Vol. 187. C. 13–16.

86. Feynmann, R. P. A Relativistic Cutoff for Classical Electrodynamics / R. P. Feynmann // Phys. Rev. 1948. Vol. 74, № 8. P. 939–946.

87. Gamov, G. Variability of Elementary Charge and Quasistellar Objects / G. Gamov // Phys. Rev. Lett. 1967. Vol. 19, № 16. P. 913–914.

88. Gawiser, E. The Cosmic Microwave Background Radiation / E. Gawiser, J. Silk // Phys. Rep. 2000. Vol. 333–334. P. 245–267.

89. Hawking, S. W. Gravitationally Collapsed Objects of Very Low Mass / S. W. Hawking // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1971. Vol. 152 (1). P. 75–78.

90. Hinshaw, G. Three-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Implication for Cosmology / G. Hinshaw, M. R. Nolta, C. L. Bennet et al. // Astrophys. J. Suppl. 2007. Vol. 170, № 2. P. 377–408.

91. Klebesadel, R. W. Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin / R. W. Klebesadel, I. B. Strong, R. A. Olson // Astrophys. J. 1973. Vol. 182, № 1. P. L85–L88.

92. Klimenko, A. V. Gravitationally-neutral Universe / A. V. Klimenko, V. A. Klimenko // J. of Modern Physics. 2014. Vol. 5, № 15. P. 1524–1536.

93. Klimenko, A. V. Worlds and Antiworlds / A. V. Klimenko, V. A. Klimenko // J. of Mod. Phys. 2014. Vol. 5. P. 1537–1545.

94. Meegan, C. A. Spatual Distribution of Gamma-ray Bursts Observed by BATS E / C. A. Meegan et al. // Nature. 1992. Vol. 355. P. 143–145.

95. Omnès, R. On the Origin of Matter and Galaxies // Astron. Astrophys. 1971. Vol. 10. P. 228–245.

96. Paczynski, B. Gamma-ray Bursters at Cosmological Distances / B. Paczynski // Astrophys. J. 1986. Vol. 308. P. 43–46.

97. Perlmutter, S. Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae / S. Perlmutter, C. Aldering, G. Goldhaber et al. // Astroph. J. 1999. Vol. 517, № 2. P. 565–586.

98. Pound, R. V. Gravitational Red-Shift in Nuclear Resonance / R. V. Pound, Jr. G. Rebka // Phys. Rev. Lett. 1959. Vol. 3. P. 439–441.

99. Rassat, A. Planck CMB Anomalies: Astrophysical and Cosmological Secondary Effects and the Curse of Masking / A. Rassat, J. L. Starck, F. Surecui, J. Bobin et al. // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2014. Vol. 2014, no. 8. 6 p.

100. Riess, A. C. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant / A. C. Riess, A. V. Filippenko, P. Challis et al. // Astron. J. 1998. Vol. 116, № 3. P. 1009.

101. Riess, A. G. New Hubble Space Telescope Discoveries of Type Ia Supernovae at $z > 1$: Narrowing Constraints on the Early Behavior of Dark Energy / A. G. Riess, L.-G. Strolger, S. Casertano et al. // Astrophys. J. 2007. Vol. 659, № 1. P. 98.

102. Roll, P. C. The Equivalence of Inertial and Passive Gravitational Mass / P. C. Roll, R. Krotkov, R. H. Dicke // Annals of Physics. 1964. № 26. P. 442–517.

103. Sandage, A. G. The Hubble Constant: A Summary of the Hubble Space Telescope. Program for the Luminosity Calibration of Type Supernovae by Means of Cepheid / A. G. Sandage, A. Tammann, A. Saha et al. // Astrophys. J. 2006. Vol. 653, № 2. P. 843–860.

104. Spregel, D. N. First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Determination of Cosmological Parameters / D. N. Spergel et al. (WMAP Collaboration) // Astrophys. J. Suppl. 2003. Vol. 148, no. 1. P.175–194.

105. The BICEP2 Collaboration Experiment and Three-year Data Set / BICEP2 Collabaration // Astrophys. J. 2014. Vol. 792, № 1. 29 p.

106. Zwicy, F. Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebcin / F. Zwicy // Helvetica Physica Acta. 1933. Vol. 6. P. 110–127.

*Научное издание*

КЛИМЕНКО Владимир Антонович, КЛИМЕНКО Алексей Владимирович

# ДВУЗНАКОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ

Корректор *М. В. Трифонова*
Вёрстка *М. В. Трифоновой*

Подписано в печать 30.03.17.
Формат 70×100 $^{1}/_{16}$. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 23,4. Уч.-изд. л. 23,7.
Тираж 100 экз. Заказ 9

Челябинский государственный университет
454001 Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129

Издательство Челябинского государственного университета
454021 Челябинск, ул. Молодогвардейцев, 57б