

СЕРИЯ  
**REFERO**

---

*В. Л. Яхьяев*

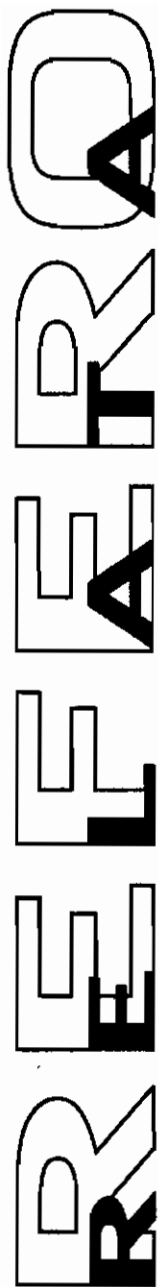
**Квантовая**



**теория**

**гравитации**





**В. Л. Янчилин**

# **Квантовая Теория Гравитации**



---

Москва • 2002

УРСС

ББК 22.314, 22.315\*

**Янчилин Василий Леонидович**

**Квантовая теория гравитации.** — М.: Эдиториал УРСС, 2002. — 256 с.  
(Серия «Relata Refco».)

ISBN 5-8360-0446-3

В книге изложены основы новой теории — квантовой теории гравитации. Впервые гравитационное взаимодействие рассматривается как исключительно квантовый эффект. Предлагается новая интерпретация квантовой механики, а также объясняется, почему пространство-время искривляется вблизи больших масс. Приводится описание простого эксперимента по проверке новой теории.

*Автор выражает благодарность Гусельникову Григорию Александровичу, старшему вице-президенту Акционерного Коммерческого Банка «БИН», взявшему на себя все расходы по изданию этой книги.*

Издание осуществлено с готового оригинал-макета.

Издательство «Эдиториал УРСС». 113208, г. Москва, ул. Чертановская, д. 2/11.  
Лицензия ИД № 03216 от 10.11.2000 г. Тигиенический сертификат на выпуск книжной продукции № 77.ФЦ.8.953.П.270.3.99 от 30.03.99 г. Подписано к печати 24.06.2002 г.  
Формат 60×90/16. Тираж 1000 экз. Печ. л. 16. Зак. № 106

Отпечатано с готовых диапозитивов  
в ГУП «Облиздат», 248640, г. Калуга, пл. Старый Торг, 5



ISBN 5-8360-0446-3

© В. Л. Янчилин, 2002  
© Эдиториал УРСС, 2002

---

---

Наше пространство можно сравнить с экраном монитора. На мониторе высокого качества различимы линии на расстоянии долей миллиметра. В то время как на плохом мониторе такие линии “размываются” в одну. Наше пространство – это “монитор” высочайшего класса. Но всё же оно не идеально. На малых расстояниях (порядка размера атома) траектории движения частиц размываются. Вследствие этого электрон (который является неделимой частицей) может пройти через два близко расположенных отверстия одновременно! Именно поэтому микромир называют странным.

Как известно, качество монитора определяется работой фокусирующих систем, направляющих пучки электронов на экран. В пространстве роль таких систем играют звёзды и галактики, заполняющие нашу Вселенную. Воздействуя своей огромной массой на элементарные частицы, звёзды и галактики ограничивают неопределённость и произвол в их движении. И благодаря этому протоны, нейтроны и электроны, из которых состоит всё (в том числе и мы с вами), не размываются по пространству, как по экрану плохого монитора.

В рамках новой теории эффект гравитации – это исключительно квантовый эффект: большая масса ограничивает неопределённость в движении частицы и в результате притягивает её.

---

---

# Оглавление

Три проблемы фундаментальной физики.....	7
Общий план книги.....	11

## Глава 1. Гравитация и современная физика

§ 1.1. Тяготение.....	12
§ 1.2. Гравитационный потенциал Вселенной.....	15
§ 1.3. Однородность гравитационного потенциала.....	19
§ 1.4. Особенности гравитации.....	22
§ 1.5. Закон инерции.....	24
§ 1.6. Принцип Маха.....	26
§ 1.7. Специальная теория относительности.....	30
§ 1.8. Масса и энергия.....	32
§ 1.9. Общая теория относительности.....	33
§ 1.10. Квантовая механика.....	35
§ 1.11. Фундаментальные постоянные.....	37
§ 1.12. Вопросы современной физики.....	39

## Глава 2. Построение новой теории

§ 2.1. Постановка задачи.....	41
§ 2.2. Эксперимент за пределами Вселенной.....	43
§ 2.3. Виртуальный кирпич.....	44
§ 2.4. набросок новой картины Мира.....	50
§ 2.5. Необходимое замечание.....	52
§ 2.6. Новый закон природы.....	53
§ 2.7. Постоянство скорости света.....	56
§ 2.8. Экспериментальная проверка Нового закона.....	58
§ 2.9. Постоянная тонкой структуры.....	60
§ 2.10. Постоянная Планка в гравитационном поле.....	62

## Глава 3. Основы новой теории

§ 3.1. Новая модель пространства-времени.....	65
§ 3.2. Инерция и гравитация.....	67
§ 3.3. Формула Эйнштейна.....	69
§ 3.4. Масса в гравитационном поле.....	70
§ 3.5. Чему равна потенциальная энергия?.....	72
§ 3.6. Масса элементарной частицы.....	77
§ 3.7. Современная физика и принцип Маха.....	79
§ 3.8. Резюме.....	82

## Глава 4. Новая интерпретация общей теории относительности

§ 4.1. Основы общей теории относительности .....	85
§ 4.2. Кривизна пространства-времени.....	87
§ 4.3. Релятивистские гравитационные эффекты.....	89
§ 4.4. Границы общей теории относительности.....	93
§ 4.5. Принцип эквивалентности.....	95
§ 4.6. Отклонение световых лучей.....	96
§ 4.7. Распространение электромагнитных волн.....	97
§ 4.8. Показатель преломления.....	102
§ 4.9. Смещение спектральных линий .....	105
§ 4.10. Чёрные дыры.....	108
§ 4.11. Задержка радиосигнала .....	110

## Глава 5. Парадоксы квантовой механики

§ 5.1. История квантовой механики.....	113
§ 5.2. Волновая $\Psi$ -функция.....	118
§ 5.3. Две интерпретации квантовой механики .....	121
§ 5.4. Интерференция электронов.....	125
§ 5.5. Спор Эйнштейна и Бора.....	128
§ 5.6. Виртуальные фотоны.....	133
§ 5.7. Квантовая механика и здравый смысл .....	137

## Глава 6. Новая интерпретация квантовой механики

§ 6.1. Хаос – граница пространства и времени.....	141
§ 6.2. Дискретное движение.....	144
§ 6.3. Соотношение неопределённостей.....	148
§ 6.4. Модель электрона.....	150
§ 6.5. Редукция волновой $\Psi$ -функции.....	152
§ 6.6. Расщепление волнового пакета.....	155
§ 6.7. Нелокальность квантовой механики .....	158
§ 6.8. Парадокс Эйнштейна – Подольского – Розена .....	161
§ 6.9. Почему время необратимо? .....	162
§ 6.10. Корпускулярно – волновой дуализм.....	165

## Глава 7. Квантовая теория гравитации

§ 7.1. Главный недостаток общей теории относительности с точки зрения квантовой механики .....	167
§ 7.2. Механизм Всемирного тяготения .....	171
§ 7.3. Принцип наименьшего действия .....	174
§ 7.4. Уравнение движения в квантовой теории гравитации.....	177

§ 7.5. Закон тяготения Ньютона.....	181
§ 7.6. Теория тяготения Эйнштейна.....	182
§ 7.7. Отличие квантовой теории гравитации от общей теории относительности.....	184
§ 7.8. Преимущества квантовой теории гравитации.....	187

## Глава 8. Время и гравитация

§ 8.1. Пространственно-временной масштаб.....	191
§ 8.2. Неоднородность времени.....	193
§ 8.3. Эксперимент по проверке квантовой теории гравитации.....	195
§ 8.4. Эксперименты по проверке общей теории относительности.....	198
§ 8.5. Фотоны в гравитационном поле.....	200
§ 8.6. Время и общая теория относительности.....	203
§ 8.7. Частица в гравитационном поле.....	207

## Глава 9. Проблемы современной космологии

§ 9.1. Измерение расстояний.....	211
§ 9.2. Расширение Вселенной.....	215
§ 9.3. $\Lambda$ -член.....	217
§ 9.4. Скрытая масса.....	219
§ 9.5. Возраст Вселенной.....	222
§ 9.6. Барийонная асимметрия Вселенной.....	223
§ 9.7. Квазары.....	224
§ 9.8. Ускорение галактик.....	225
§ 9.9. Инфляция.....	227

## Глава 10. Космология с точки зрения квантовой теории гравитации

§ 10.1. Эволюция Вселенной.....	231
§ 10.2. Куда исчезло антивещество?.....	233
§ 10.3. Источник энергии квазаров.....	235
§ 10.4. Происхождение радиоактивных элементов.....	236
§ 10.5. Плотность материи во Вселенной.....	238
§ 10.6. Красное смещение.....	240
§ 10.7. Постоянная Хаббла.....	244
§ 10.8. Физический вакуум.....	245
§ 10.9. Масса и размеры Вселенной.....	246
§ 10.10. Эксперимент по измерению скорости расширения Вселенной.....	248
§ 10.11. Экспериментальная астрофизика.....	251

Список литературы.....	254
------------------------	-----

# Три проблемы фундаментальной физики

Для того чтобы лучше понять, о чём пойдёт речь в книге, давайте ознакомимся с тремя очень интересными и нерешёнными проблемами фундаментальной физики.

## Проблема 1. Принцип Маха.

Ещё Ньютон обратил внимание на тот факт, что существует два вида движений: относительное и абсолютное. Прямолинейное движение тела является относительным движением, а вращательное – абсолютным.

Мы не сможем сказать, с какой скоростью мы движемся (например, с какой скоростью движется планета Земля), если не укажем другое тело, относительно которого будем рассматривать наше движение.

Но мы всегда сможем узнать, с какой скоростью мы вращаемся (например, с какой скоростью вращается Земля). Это возможно потому, что во вращающемся теле возникают центробежные силы, которые деформируют тело. По величине центробежных сил или по вызванной ими деформации всегда можно определить скорость вращения тела.

При этом возникает вопрос: а относительно чего, собственно говоря, тело вращается?

В конце девятнадцатого века австрийский физик Эрнст Мах выдвинул интересную гипотезу (названную впоследствии принципом Маха): тело вращается относительно неподвижных звёзд. И вследствие какой-то пока невыясненной связи между огромной массой звёзд и вращающимся телом и возникают центробежные силы.

Но как проверить такое предположение? Вот что писал об этом, например, такой известный физик, как Ричард Фейнман:



«В настоящее время у нас нет способа узнать, существовала бы центробежная сила, если бы не было звёзд и туманностей. Не в наших силах сделать такой эксперимент – убрать все туманности, а затем измерить наше вращение; значит, тут мы ничего сказать не можем» [7,с.286].

В 1979 году в Берлине состоялась международная научная конференция, посвящённая 100-летию со дня рождения Альберта Эйнштейна. На ней обсуждались наиболее фундаментальные проблемы современной физики. В том числе говорилось и об отношении принципа Маха к общей теории относительности. Вот несколько строк из резюме по данному вопросу: «Известно, что Эйнштейн не только принимал этот неортодоксальный принцип и восхищался им, но и надеялся привести свою теорию в согласие с системой идей Маха. Эйнштейн пытался всеми возможными средствами включить общую теорию относительности в принцип Маха, или наоборот. Поэтому он видоизменил первую классическую формулировку общей теории относительности. В этом направлении и по сей день предпринимаются попытки, – неустанно, порой с обескураживающими результатами, часто с помощью весьма остроумных манипуляций, – достичь цели, к которой стремился Эйнштейн» [15;с.293].

И всё-таки проблему, связанную с принципом Маха, можно решить! Но для этого нужно проделать следующее.

Во-первых, раскрыть его *физическое* содержание (которое пока не ясно).

Во-вторых, построить *новую* физическую теорию, которая содержала бы в себе, кроме известных физических законов, также и принцип Маха. До настоящего времени такой теории не было.

В-третьих, рассчитать (а значит, и предсказать) *принципиально новые следствия*, которые вытекают из новой теории и которые можно экспериментально проверить в земных условиях (естественно, не трогая неподвижные звёзды). И в результате определить, верен или нет принцип Маха.

### **Проблема 2. Корпускулярно-волновой дуализм.**

В физике существуют такие понятия как частица и волна. Эти понятия – антагонисты. Свойства частицы и свойства волны взаимоисключают друг друга. Тем не менее, квантовые объекты ведут себя то как волны, а то как частицы.

Например, электрон, с одной стороны (то есть при одних условиях проведения эксперимента), является частицей. Более того, неделимой частицей. Никто никогда не наблюдал, скажем, пол-электрона или какую-либо его часть.

Но, с другой стороны (то есть при других условиях проведения эксперимента), электрон запросто может пройти сразу через два (и более) отверстия!

Тот, кто этого ещё не знает, скорее всего, в это не поверит. Ничего удивительного! В своё время такой выдающийся физик как Альберт Эйнштейн (который, кстати, очень много сделал для создания квантовой механики) так и не принял до конца квантовую механику. Он считал, что физическая теория не должна так радикально расходиться со здравым смыслом.

В настоящее время волновая природа электрона – хорошо проверенный экспериментальный факт. Желаящие прочитать чёткий и ясный рассказ об этом могут обратиться к Фейнмановским лекциям по физике, т.3,4, гл. 37: «Квантовое поведение».

Нужно отметить, что квантовая механика прекрасно описывает “странное” поведение квантовых объектов. Но описать – не означает объяснить. До сих пор никто не знает, откуда в микромире взялась неопределённость, и как неделимый электрон ухитряется пройти через два отверстия одновременно. Вот что писал о таком “странном” поведении квантовых объектов Ричард Фейнман: «Но мне кажется, я смело могу сказать, что квантовой механики никто не понимает» [11;с.117].

### **Проблема 3. Гравитация и квантовая механика.**

Всё, что существует в природе, притягивается друг к другу. С другой стороны, всё, что существует в природе, подчиняется законам квантовой механики, в основе которой лежит принцип

неопределённости. Благодаря этому принципу каждая частица обладает волновыми свойствами. Но в современной теории гравитации – теории тяготения Эйнштейна (впрочем, как и в теории тяготения Ньютона) – нисколько не учитывается этот фундаментальный принцип, то есть совсем не учитывается то, что частицы обладают волновыми свойствами. Поэтому естественным образом возникает следующий вопрос. Можно ли объединить теорию гравитации и квантовую механику таким образом, чтобы при гравитационном взаимодействии учитывались волновые свойства частиц? На сегодняшний день такой квантовой теории гравитации не существует.

Как будет видно в дальнейшем, все эти три проблемы связаны между собой. И когда нам удастся понять физический смысл принципа Маха, мы поймём, откуда взялась неопределённость в микромире. А, поняв причину происхождения неопределённости в микромире, мы поймём, почему тела притягиваются друг к другу. Решению этих проблем и посвящена эта книга.

Забегая вперёд, можно сказать, что, оказывается, в основе гравитационного взаимодействия лежит принцип неопределённости, то есть гравитация – это исключительно квантовый эффект!

Все вопросы и предложения можно направлять по электронному адресу:

[yanchilin@mail.ru](mailto:yanchilin@mail.ru)

<http://yanchilin.hut.ru>

## Общий план книги

Первое новое уравнение (Новый закон) вводится в § 2.6, и всё дальнейшее построение новой теории является по своей сути следствием этого уравнения. Основные положения новой теории подробно изложены в 3-й главе. И на их основе в §§ 4.6-4.9 рассчитывается уравнение движения света в гравитационном поле, в том числе определяются угол отклонения и величина гравитационного смещения спектральных линий.

В 7-й главе на основе новой теории формулируется *квантовая* теория гравитации. При этом раскрывается физический смысл “искривлённого” пространства-времени: в гравитационном поле изменяются размеры атомов (радиусы электронных оболочек), изменяются энергии перехода электронов с одного уровня на другой, изменяются частоты излучения и длины волн спектральных линий. Именно это и является причиной того, что в гравитационном поле изменяется масштаб времени и масштаб длины (искривление пространства-времени вблизи больших масс).

Исходя из того, что частица обладает волновыми свойствами, в § 7.4 рассчитывается уравнение её движения в гравитационном поле.

В § 7.7 показано, в чём состоит принципиальное отличие квантовой теории гравитации от общей теории относительности. И в § 8.3 предлагается простой эксперимент, по результатам которого можно будет сделать однозначный выбор между квантовой теорией гравитации и общей теорией относительности.

В § 8.7 на простом примере показано принципиальное противоречие между общей теорией относительности и квантовой механикой.

В 6-й главе даётся наглядное объяснение квантово-механическим парадоксам с новой точки зрения, а в 10-главе предлагается решение некоторых проблем современной космологии.

# Глава 1

# Гравитация и Современная Физика

Эта глава вводная. В ней вкратце рассказывается об основных идеях, лежащих в фундаменте современной физики. При этом особое внимание уделяется нерешённым проблемам.

## § 1.1. Тяготение

Все тела притягиваются друг к другу. Чем больше масса тела, тем сильнее оно притягивает другие тела, то есть тем сильнее гравитационное поле, создаваемое им. Сила гравитационного притяжения между двумя телами пропорциональна их массам ( $M$  и  $m$ ) и обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r$  между ними. Математически закон Всемирного тяготения выглядит так:

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (1.1)$$

Здесь  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ кг}^1 \text{ см}^3 \text{ с}^{-2}$  – гравитационная постоянная.

Второй закон Ньютона утверждает, что:

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (1.2)$$

Это означает, что под действием силы  $\vec{F}$  тело массы  $m$  будет двигаться с ускорением:

$$\vec{a} = \vec{F}/m$$

Поэтому из уравнения (1.1) следует, что тело массы  $m$  будет двигаться навстречу телу массы  $M$  с ускорением  $\vec{a}$ , величина которого равна:

$$a = G \frac{M}{r^2} \quad (1.3)$$

То есть ускорение тела в гравитационном поле не зависит от его массы.

Вообще говоря, следует отличать массу, которая входит в закон Всемирного тяготения (она называется гравитационной, или тяжёлой массой), от массы, которая входит во Второй закон Ньютона (она называется инертной, или инерциальной массой). Но ещё Ньютон обнаружил, что для различных веществ эти массы с хорошей степенью точности пропорциональны друг другу. Такой вывод Ньютон сделал, основываясь на следующем наблюдении. Период колебаний ящика, подвешенного на верёвке, *не зависит* от его содержимого. А такое возможно только в том случае, если инертная масса ящика всегда пропорциональна его гравитационной массе.

Существующие системы единиц измерения специально выбраны так, чтобы в них коэффициент пропорциональности между инертной и гравитационной массами был равен единице. Таким образом, в существующих системах единиц измерения инертная масса равна гравитационной массе.

В общем случае гравитационное поле, создаваемое массой  $M$  на расстоянии  $r$ , можно охарактеризовать тремя физическими величинами.

Во-первых, это ускорение  $g$ , с которым будет двигаться любое тело в этом поле. Это векторная величина, и именно она обычно называется гравитационным полем.

Во-вторых, это скорость распространения гравитационного поля  $V_{grav}$ . Например, мы сдвинули массу  $M$ . Через какое время тело, находящееся на расстоянии  $r$  от этой массы, “почувствует” изменение гравитационного поля? Скорость распространения гравитационного поля равна скорости света:

$$V_{grav} = c \approx 300.000 \text{ км/с} \quad (1.4)$$

В теории тяготения Ньютона предполагается, что гравитационное взаимодействие распространяется мгновенно. А в теории тяготения Эйнштейна предполагается, что скорость

распространения гравитационного поля всегда и везде одинакова и равна  $300.000 \text{ км/с}$ .

И, наконец, третьей величиной, которая характеризует гравитационное взаимодействие, является гравитационный потенциал  $\varphi$ :

$$\varphi = -G \frac{M}{r} \quad (1.5)$$

Гравитационный потенциал имеет следующий физический смысл. Это работа, которую нужно совершить над единичной массой, чтобы удалить её из данного поля тяготения. Знак минус как раз говорит о том, что работу придётся совершать нам, а не полю, то есть потенциальная энергия тела  $U$  в гравитационном поле всегда отрицательна. Для тела массы  $m$  она равна:

$$U = m\varphi$$

Обычно при изучении гравитации больше внимания уделяют гравитационным полям. Но в этой книге именно гравитационный потенциал будет играть самую важную роль.

Напомним, что гравитационный потенциал на поверхности однородного шара массы  $M$  и радиуса  $R$  равен:

$$\varphi = -G \frac{M}{R}$$

А в центре шара потенциал равен:  $\varphi = -\frac{3GM}{2R}$ .

То есть в полтора раза больше. В то время как гравитационное поле в центре шара равно нулю.

В общем случае гравитационный потенциал внутри какого-нибудь объекта массы  $M$  с некоторым средним радиусом  $R$  можно приближённо (с точностью до численного коэффициента, который зависит от конкретного распределения плотности) оценить по формуле:

$$\varphi \approx -G \frac{M}{R} \quad (1.6)$$

## § 1.2. Гравитационный потенциал Вселенной

Все мы притягиваемся к Земле. Масса Земли по меркам человека огромна:

$$M = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг} = 6\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000 \text{ кг}$$

Для того чтобы преодолеть притяжение Земли, человеку понадобилось достичь скорости несколько километров в секунду!  $8 \text{ км/с}$  – это минимальная скорость, с которой тело должно двигаться вокруг Земли, чтобы не упасть на неё. Она называется первой космической скоростью.  $11 \text{ км/с}$  – это минимальная скорость, которую должно иметь тело, чтобы вылететь из гравитационного поля Земли. Это так называемая вторая космическая скорость.

Но по космическим меркам масса Земли чрезвычайно мала! Например, масса Солнца, вокруг которого вращается Земля, в триста тысяч раз больше и составляет  $M_S = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$ . Чтобы вылететь из гравитационного поля Солнца, нужно развить скорость более  $40 \text{ км/с}$ .

И чем дальше человек проникает в глубины Вселенной, используя мощнейшие телескопы, тем более грандиозные миры раскрываются перед ним. Например, наша Галактика состоит примерно из  $100$  миллиардов звёзд и имеет массу порядка  $M_{Gal} \approx 10^{41} \text{ кг}$  и размеры около  $100\,000$  световых лет. Чтобы вылететь из её поля притяжения, нужно развить скорость более  $200 \text{ км/с}$ .

Под действием сил гравитационного притяжения галактики образуют скопления. А скопления галактик, в свою очередь, под действием гравитационных сил образуют гигантские сверхскопления. Например, сверхскопление в созвездии Девы, куда входит наша Галактика, состоит примерно из  $2\,500$  галактик. Оно имеет массу порядка  $M_{Cl} \approx 10^{44} \text{ кг}$  и размеры около  $50 \text{ млн.}$  световых лет. Чтобы вылететь из его поля притяжения, нужно развить скорость около  $500 \text{ км/с}$ .

Но и масса такого сверхскопления ничтожна по сравнению с остальной массой Вселенной. Массу Вселенной  $M_{Un}$  можно приближённо оценить по формуле:



$$M_{Un} \approx \frac{4}{3} \pi \rho_{Un} R_{Un}^3 \quad (1.7)$$

где  $\rho_{Un} \approx 10^{-26} \text{ кг/м}^3$  – средняя плотность вещества во Вселенной, а  $R_{Un}$  – радиус Вселенной. Для приближённой оценки радиуса Вселенной можно использовать величину:

$$R_{Un} \approx c T_{Un}$$

Здесь  $c$  – скорость света, а  $T_{Un} \approx 15 \text{ млрд. лет} \approx 5 \cdot 10^{17} \text{ с}$  – время жизни Вселенной, то есть время, прошедшее с того момента, когда материя во Вселенной находилась в сверхплотном состоянии. Таким образом, получаем:  $R_{Un} \approx 10^{26} \text{ м}$ . Подставляя это значение в уравнение (1.7), получаем:

$$M_{Un} \approx 4 \cdot 10^{52} \text{ кг} \quad (1.8)$$

Это составляет почти триллион галактик! Интересно, какую нужно развить скорость, чтобы вылететь из гравитационного поля Вселенной? В принципе, это нетрудно рассчитать.

Гравитационный потенциал  $\Phi_{Un}$ , создаваемый всей массой Вселенной (гравитационный потенциал, создаваемый всей массой Вселенной, здесь и далее мы будем обозначать как  $\Phi_{Un}$ ) можно оценить по формуле (1.6):

$$\Phi_{Un} \approx -GM_{Un}/R_{Un} \quad (1.9)$$

Подставляя в это уравнение значения для массы и радиуса Вселенной, получаем:

$$\Phi_{Un} \approx -3 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 \quad (1.10)$$

Чтобы тело массы  $m$  смогло вылететь из гравитационного поля Вселенной (за пределы Вселенной), ему нужно совершить работу:  $A = -m\Phi_{Un}$ . А для этого оно должно обладать

кинетической энергией:  $K = \frac{mV^2}{2} = -m\Phi_{Un}$       *ок*

И, следовательно, скоростью:  $V = \sqrt{-2\Phi_{Un}} \approx 2,5 \cdot 10^8 \text{ м/с}$

Мы получили, что для преодоления гравитационного притяжения Вселенной тело должно двигаться с околосветовой скоростью! Разумеется, в этом случае формула для кинетической энергии  $K = mV^2/2$  уже не верна. Но для нас это не так важно, мы

ведь сделали только качественные оценки. Ошибки в расчётах в данном случае вносит и значение средней плотности Вселенной, и значение её радиуса. Значение этих величин известно с очень плохой точностью. Но одно мы можем сказать наверняка: для того чтобы вылететь за пределы гравитационного поля Вселенной, нужна очень большая, околосветовая скорость.

Давайте возведём в квадрат скорость света:  $c^2 = (3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2$ . Получается, что гравитационный потенциал, создаваемый всей массой Вселенной (1.10), примерно равен квадрату скорости света!

А что если это не случайное совпадение? И квадрат скорости света, взятый со знаком минус, окажется в точности равным гравитационному потенциалу Вселенной? По крайней мере, точность современных данных о массе и размерах Вселенной не исключает такой возможности:

$$\Phi_{Un} = -c^2 \approx -10^{17} \text{ м}^2/\text{с}^2 \quad (1.11)$$

Гравитационная энергия тела массы  $m$  в поле с потенциалом  $\Phi_{Un}$  равна:  $U = m\Phi_{Un}$ .

С другой же стороны, согласно формуле Эйнштейна полная энергия тела равна:  $E = mc^2$ . И если  $\Phi_{Un} = -c^2$ , то окажется что:

$$E + U = 0 \quad (1.12)$$

В этом случае для любого тела сумма его полной и гравитационной энергии тождественно равна нулю!

Похожие оценки приводил, например, Ричард Фейнман в своих лекциях по гравитации. Вот что он писал об этом: «Пользуясь этой оценкой, мы получаем чрезвычайно интересный результат, что полная энергия Вселенной равна нулю. Почему так должно быть, является одной из величайших тайн – и, следовательно, одним из важнейших вопросов физики. После всего этого можно задать вопрос, что мы должны были бы изучать в физике, если подобные тайны не являются столь важными, чтобы их исследовать» [10; с.68]. Мы прислушаемся к совету Фейнмана, будем исследовать этот вопрос и во второй главе найдём на него ответ. Причём мы найдём такой ответ, истинность которого можно будет проверить экспериментально.

Гравитационные силы (гравитационные поля) быстро убывают с расстоянием – пропорционально квадрату расстояния (1.1). А из-за того, что материя во Вселенной распределена практически равномерно, гравитационные силы, создаваемые различными галактиками, уравнивают друг друга. Например, силы гравитации, которые действуют на каждый атом нашего тела со стороны огромных масс Вселенной, находящихся, скажем, в направлении Полярной звезды, уравниваются гравитационными силами, создаваемыми массами, находящимися в противоположном направлении.

Совсем иное дело – гравитационный потенциал.

Во-первых, гравитационный потенциал, создаваемый каким-нибудь телом, медленно убывает с расстоянием – пропорционально первой степени расстояния (1.5). Во-вторых, в отличие от гравитационной силы гравитационный потенциал является скаляром, а не вектором. Поэтому гравитационные потенциалы, создаваемые различными телами в какой-нибудь точке пространства, просто складываются между собой. Всё это и приводит к тому, что величина гравитационного потенциала, создаваемого всей массой Вселенной в околоземном пространстве, такая огромная (1.10). В противоположность гравитационному полю Вселенной, которое в среднем равно нулю и существенно возрастает лишь вблизи больших масс.

Окружающее нас пространство можно образно назвать огромным гравитационным океаном, в который погружена наша Вселенная. Гравитационные поля можно сравнить с подводными течениями, а роль глубины в этом океане играет гравитационный потенциал, создаваемый всеми массами, существующими во Вселенной. Глубина этого океана огромна и составляет примерно (1.10):  $\Phi_{Ун} \approx -10^{17} \text{ м}^2/\text{с}^2$ . Знак минус как раз показывает, что гравитационный потенциал является глубиной. Величина глубины имеет простой физический смысл – это энергия, которую должна иметь масса в  $1 \text{ кг}$ , чтобы вырваться из этого океана.

Итак, физическое тело, движущееся в пространстве, движется в гравитационном океане. То есть *оно взаимодействует*

*со всеми остальными телами во Вселенной. Гигантская глубина этого океана как раз и означает огромную энергию гравитационного взаимодействия данного тела со всеми остальными телами во Вселенной.*

### **§ 1.3. Однородность гравитационного потенциала**

Мы знаем, что движение тел можно описать с помощью физических законов. Это законы классической механики, теории относительности и квантовой механики. Но мы не знаем, почему движение тел подчиняется этим законам. Такой вопрос даже не принято задавать.

А что если наблюдаемое движение тела есть *результат гравитационного взаимодействия этого тела со всеми остальными массами Вселенной?* Тогда движение тела будет зависеть от его гравитационной энергии, то есть зависеть от величины гравитационного потенциала Вселенной в данной точке пространства. А это в свою очередь будет означать, что и законы физики зависят от величины гравитационного потенциала.

Из данных астрономических наблюдений мы знаем, что физические законы одни и те же во всей Вселенной. В далёких галактиках действуют те же самые (или, по крайней мере, почти те же самые) физические законы, что и на Земле. А гравитационный потенциал, как известно, сильно изменяется вблизи больших масс. Не противоречит ли это нашему предположению о том, что физические законы могут зависеть от величины гравитационного потенциала?

Давайте посмотрим, *как сильно* изменяется гравитационный потенциал вблизи больших масс. Изменение гравитационного потенциала  $\Delta\varphi$  на поверхности Земли по сравнению с потенциалом окружающего пространства составит величину:  $\Delta\varphi = -GM/R$ , где  $R \approx 6,4 \cdot 10^6$  м – радиус Земли, а  $M = 6 \cdot 10^{24}$  кг – её масса. В результате мы получаем:

$$\Delta\varphi \approx -6 \cdot 10^7 \text{ м}^2/\text{с}^2 \quad (1.13)$$

Гравитационный потенциал Вселенной на поверхности Солнца будет отличаться от гравитационного потенциала на поверхности Земли примерно на величину:  $\Delta\varphi_S \approx -GM_S/R_S$ , где  $R_S \approx 7 \cdot 10^8$  м – радиус Солнца, а  $M_S \approx 2 \cdot 10^{30}$  кг – его масса. Прodelав простые вычисления, мы получим:

$$\Delta\varphi_S \approx -2 \cdot 10^{11} \text{ м}^2/\text{с}^2$$

Это очень большая величина. Но она чрезвычайно мала по сравнению с величиной гравитационного потенциала Вселенной  $\Phi_{Un}$  (1.10):

$$|\Delta\varphi_S| \ll |\Phi_{Un}| \text{ и } \Delta\varphi_S/\Phi_{Un} \approx 6 \cdot 10^{-6} \quad (1.14)$$

Это означает, что если условно принять среднюю глубину гравитационного океана Вселенной, скажем, за 1 км, то вблизи Солнца глубина увеличивается всего на 6 мм.

Рассчитаем, насколько гравитационный потенциал внутри нашей Галактики глубже, чем в межгалактическом пространстве:  $\Delta\varphi_{Gal} \approx -GM_{Gal}/R_{Gal}$ , здесь  $R_{Gal} \approx 50\,000$  световых лет  $\approx 5 \cdot 10^{20}$  м – радиус нашей Галактики, а  $M_{Gal} \approx 10^{41}$  кг – её масса. В результате получаем:

$$\Delta\varphi_{Gal} \approx -10^{10} \text{ м}^2/\text{с}^2 \quad (1.15)$$

и:  $\Delta\varphi_{Gal}/\Phi_{Un} \approx 3 \cdot 10^{-7}$

Если даже предположить, что значительная часть галактической массы приходится на её ядро, составляющее примерно 100 световых лет (то есть размеры ядра в тысячу раз меньше, чем размеры Галактики), то в этом случае изменение гравитационного потенциала вблизи галактического центра будет примерно в тысячу раз больше, чем  $\Delta\varphi_{Gal}$  и составит величину:

$$\Delta\varphi_{GalC} \approx -10^{13} \text{ м}^2/\text{с}^2$$

Но и эта величина также очень мала по сравнению со средней глубиной космического гравитационного океана:

$$\Delta\varphi_{GalC}/\Phi_{Un} \approx 10^{-4} \quad (1.16)$$

Гравитационный потенциал внутри галактического сверхскопления в созвездии Девы будет глубже, чем в пространстве между сверхскоплениями (сверхскопления разделены огромными расстояниями порядка 300 млн. световых лет) на величину:  $\Delta\varphi_{Cl} \approx -GM_{Cl}/R_{Cl}$ , где  $R_{Cl} \approx 50$  млн. световых

### § 1.3. Однородность гравитационного потенциала 21

лет  $\approx 5 \cdot 10^{23}$  м – размер сверхскопления, а  $M_{Cl} \approx 10^{44}$  кг – его масса. Проведя вычисления, получим:

$$\Delta\varphi_{Cl} \approx -10^{12} \text{ м}^2/\text{с}^2 \quad (1.17)$$

И эта величина также очень мала по сравнению с величиной гравитационного потенциала Вселенной (1.10).

Итак, мы выяснили, что *глубина гравитационного потенциала Вселенной практически полностью определяется удалёнными огромными массами Вселенной.*

В то время как близко расположенные к нам звёзды и галактики увеличивают глубину гравитационного океана на очень незначительную в процентном отношении величину.

И если предположить, что физические законы зависят от величины гравитационного потенциала, то, по крайней мере, становится ясно, почему эти законы одни и те же во всей Вселенной. Это есть следствие того, что величина гравитационного потенциала с хорошей точностью одна и та же во всей Вселенной.

А что же всё-таки может означать наше предположение о том, что физические законы зависят от величины гравитационного потенциала? Какой физический смысл содержится в таком предположении?

Например, вблизи Солнца гравитационный потенциал, хоть и незначительно, но всё же изменяется. Какие изменения это может вызвать в физических законах?

А на окраинах Вселенной (если, конечно, у Вселенной есть окраины) глубина гравитационного потенциала должна значительно уменьшаться. Какие в этом случае там будут действовать законы движения? А может быть физические законы там вообще не будут действовать?

В дальнейшем (гл. 2 и 3) мы найдём ответы на эти вопросы. И, что самое существенное, истинность этих ответов можно будет проверить экспериментально.

## § 1.4. Особенности гравитации

Гравитационное взаимодействие обладает определёнными характерными чертами, которые делают его непохожим на другие взаимодействия (например, на электромагнитное). И в этом параграфе мы вкратце рассмотрим наиболее важные особенности гравитации.

Во-первых, ускорение тела в гравитационном поле *не зависит* от его массы. Поэтому все тела движутся в гравитационном поле с одинаковым ускорением. С одной стороны, ускорение тела пропорционально действующей на него силе и, следовательно, пропорционально его гравитационной массе (1.1). Но с другой стороны, ускорение тела обратно пропорционально его инертной массе (1.2). Таким образом, как писал Ричард Фейнман в своих лекциях по гравитации, «первый изумительный факт, связанный с гравитацией, заключается в том, что отношение инерциальной и гравитационной массы постоянно, где бы мы его не проверяли» [10;с.62].

«Второй изумительный факт, связанный с гравитацией, заключается в том, что это взаимодействие очень слабое» [10;с.62]. Рассмотрим в качестве примера два электрона. С одной стороны, между ними действует сила электрического отталкивания  $F_e$ . А с другой стороны, между ними действует сила гравитационного притяжения  $F_{gr}$ . Нетрудно посчитать, что:

$$\frac{F_e}{F_{gr}} \approx 4 \cdot 10^{42} \quad (1.18)$$

Теперь предположим, что в будущем будет построена физическая теория, объединяющая гравитацию и электричество (так называемая единая теория поля, над созданием которой работал ещё Эйнштейн). Такая теория должна будет также объяснить и происхождение гигантского числа (1.18).

Например, для того чтобы объяснить происхождение этого числа, Поль Дирак постарался найти ещё одно такое же большое число. Он обратил внимание на то, что отношение возраста Вселенной ко времени, за которое свет проходит атомное ядро, примерно равно числу (1.18). Поэтому он предположил, что это

число как-то связано с возрастом Вселенной и, следовательно, увеличивается вместе с ним. В связи с этим он даже выдвинул предположение о том, что гравитационная постоянная зависит от возраста Вселенной и уменьшается со временем. Но, по-видимому, это не верно (см. возражения Ричарда Фейнмана в § 1.11).

К загадке гравитации можно отнести и то (об этом мы уже писали в § 1.2), что сумма полной энергии нашей Вселенной и её гравитационной энергии (в пределах точности астрофизических наблюдений) равна нулю.

Существенной особенностью гравитации является и её универсальный характер – всё, что существует в природе, участвует в гравитационном взаимодействии. Кроме того, гравитация – это всегда *только притяжение*, а гравитационного отталкивания просто *не существует*.

И, наконец, можно отметить следующее. Законы, управляющие нашим миром, в самой своей основе – это законы квантовой механики. Иначе говоря, *в фундаменте всех физических взаимодействий лежит принцип неопределённости*.

Но ни закон тяготения Ньютона, ни его модификация, сделанная Эйнштейном в общей теории относительности, совершенно не учитывают этот фундаментальный принцип. Вот что, к примеру, пишет об этом Ричард Фейнман: «для последовательности наших физических теорий было бы важно понять, должен ли закон Ньютона с внесённым Эйнштейном видоизменением быть изменён и дальше с тем, чтобы согласовываться с принципом неопределённости. Это последнее видоизменение пока не сделано» [7;с.141].

В дальнейшем, основываясь на «случайном» совпадении (1.11), мы построим *квантовую* теорию гравитации, которая позволит объяснить *все* перечисленные выше особенности гравитационного взаимодействия.

Но прежде чем приступить к построению новой теории, давайте вкратце рассмотрим основные законы, лежащие в фундаменте современной физике, а также связанные с ними проблемы.



## § 1.5. Закон инерции

Основой классической механики (механики Ньютона) является закон инерции, который гласит: скорость свободно движущегося тела остаётся постоянной. Иначе говоря, если на тело не действуют никакие силы (или хотя бы равнодействующая всех сил равна нулю), то тело будет двигаться в одном и том же направлении, с одной и той же скоростью сколь угодно долго. Например, обломок какой-нибудь звезды может двигаться в межгалактическом пространстве с одной и той же скоростью миллионы лет пока не столкнётся с каким-нибудь другим обломком.

На первый взгляд, закон инерции прост и очевиден. Но это не так. Если бы закон инерции был очевиден, его бы открыли задолго до Галилея. Насколько сейчас известно, Галилей был первым, кто не только размышлял над проблемой движения, но и проводил опыты с различными телами. Он заметил, что тела, движущиеся по земной поверхности, останавливаются под действием сил трения. Чем меньше трение, тем дольше тело движется. Галилей догадался, что в отсутствии трения тело может двигаться сколь угодно долго. И сделал вывод, что естественное состояние любого тела – это движение, а не покой.

Однако до сих пор закон инерции не имеет никакого теоретического обоснования. Вот что пишет, например, Ричард Фейнман по этому поводу: «Но свободное движение не имеет никакой видимой причины. Почему предметы способны вечно лететь по прямой линии, мы не знаем. Происхождение закона инерции до сих пор остаётся загадкой» [11; с.14].

Чтобы показать, что закон инерции не так прост, как кажется на первый взгляд, достаточно задать следующий вопрос. Относительно чего скорость тела остаётся постоянной? Очевидно, что скорость тела может оставаться постоянной только относительно другого тела, скорость движения которого также постоянна. Но откуда мы знаем, что скорость другого тела постоянна?

Для того чтобы вырваться из этого замкнутого круга, в физике вводится такое понятие, как инерциальная система отсчёта. По определению инерциальная система отсчёта – это такая система отсчёта, в которой выполняется закон инерции. То есть относительно инерциальной системы отсчёта свободно движущееся тело будет двигаться с постоянной скоростью. Подчеркнём, что это – всего лишь определение.

А затем даётся следующая формулировка закону инерции. *Существует хотя бы одна инерциальная система отсчёта.* А вот это – уже аксиома. Она носит название Первого закона Ньютона. Можно отметить, что любая система отсчёта, движущаяся с постоянной скоростью относительно инерциальной системы отсчёта, также является инерциальной.

Таким образом, свободно движущееся тело движется с постоянной скоростью относительно инерциальной системы отсчёта. Получается, что движение тела каким-то образом связано с инерциальной системой отсчёта. Но ведь инерциальная система отсчёта – это только абстрактное понятие! Оно введено в физику для удобства описания движения. Как же движение тела может быть связано с абстрактным понятием?

Конечно, инерциальную систему отсчёта можно реально создать. Например, космический корабль, летящий меж звёзд с выключенными двигателями, является инерциальной системой отсчёта с высокой степенью точности. В этом случае свободно движущееся тело будет двигаться с постоянной скоростью относительно этого корабля. Но это ещё более непонятно, так как теперь получается, что движение тела каким-то образом связано с движением корабля!

Первый закон Ньютона только утверждает, что существует хотя бы одна инерциальная система отсчёта. Но этот закон ничего не говорит нам о том, *почему* она существует. Он также ничего не говорит нам о том, как *физически* осуществляется связь между свободно движущимся телом и инерциальной системой отсчёта. Существование инерциальной системы отсчёта – это открытый вопрос в современной физике.

Из эксперимента также известно, что система отсчёта, связанная с неподвижными звёздами, является инерциальной с очень высокой степенью точности. Конечно, на самом деле, звёзды не являются неподвижными. Они движутся с очень большими скоростями – это сотни километров в секунду. Но из-за того, что они находятся очень далеко от нас, их движение практически не заметно.

Так может быть, движение тела по инерции как-то связано с неподвижными звёздами?

Обсуждению этой темы посвящён следующий параграф.

## § 1.6. Принцип Маха

Итак, тело в отсутствие действующих на него сил движется равномерно и прямолинейно. А чтобы оно отклонилось от своего пути, нужно приложить силу. Чем более массивным является тело, тем труднее изменить его движение. Для того чтобы телу массы  $m$  сообщить ускорение  $a$ , нужно приложить силу:  $F = ma$ . Так утверждает Второй закон Ньютона. Таким образом, любая масса оказывает сопротивление ускорению. Опять возникает вопрос: ускорению относительно чего?

Правильный ответ такой (его можно прочитать в любом учебнике физики): относительно инерциальной системы отсчёта. Но как уже отмечалось, инерциальная система отсчёта – это всего лишь удобное понятие. Какая физическая связь может быть между телом и инерциальной системой отсчёта?

В конце 19-го века австрийский физик Эрнст Мах выдвинул следующую гипотезу (названную впоследствии принципом Маха). *Инерциальные системы отсчёта существуют только благодаря неподвижным звёздам – удалённым массам Вселенной.* При этом центр масс Вселенной является естественной инерциальной системой отсчёта. А свободно движущееся тело движется с постоянной скоростью относительно центра масс Вселенной – относительно удалённых массивных объектов. В этом случае тело оказывает сопротивление ускорению только потому, что ускоряется относительно неподвижных звёзд.

Здесь можно привести следующее сравнение. Существуют поля, действующие на тело независимо от того, движется оно или нет. Это, например, гравитационные и электрические поля. Но, скажем, магнитное поле действует только на движущийся заряд. Силы инерции можно в каком-то смысле сравнить с магнитными силами. Они возникают только в том случае, когда масса движется с ускорением относительно неподвижных звёзд. Звёзды своей огромной массой как бы создают поле инерциальных сил.

Физики спрашивали Маха: выходит, если убрать звёзды, то тело уже не будет оказывать сопротивление ускорению и потеряет свою инерцию? Но Мах уходил от прямого ответа.

Гораздо последовательней в этом вопросе был Альберт Эйнштейн, с большой симпатией относившийся к принципу Маха. В период создания общей теории относительности он надеялся, что принцип Маха найдёт своё воплощение в его теории. Вот что он писал в то время: «...в последовательной теории относительности нельзя определять инерцию по отношению к “пространству”, но можно определять инерцию масс относительно друг друга. Поэтому если я удалю какую-нибудь массу на достаточно большое расстояние от всех других масс Вселенной, то инерция этой массы должна стремиться к нулю. Попытаемся сформулировать это условие математически» [1;с.605]. То есть Эйнштейн утверждал, что на достаточно большом удалении от всех масс Вселенной тело не будет обладать инерцией. С этой позицией Эйнштейна был вполне солидарен и Паули: «Поскольку Мах ясно осознавал именно этот указанный выше недостаток механики Ньютона и заменил абсолютное ускорение ускорением относительно остальных масс Вселенной, Эйнштейн [1;с.613] назвал этот постулат принципом Маха. Этот принцип, в частности требует, чтобы инерция материи определялась только окружающими его массами и таким образом исчезала, если все остальные массы будут устранены, так как с релятивистской точки зрения не имеет никакого смысла говорить о сопротивлении *абсолютному* ускорению. (*относительность инерции*)» [49;с.250].

Тем не менее, когда общая теория относительности была построена, оказалось, что она не удовлетворяет принципу Маха.

И на протяжении всего двадцатого века различными учёными предпринимались попытки построить физическую теорию на основе принципа Маха. Но эти попытки не увенчались успехом. Создаётся впечатление, что принцип Маха просто не вписывается в современную физику.

Вот, например, что написано об этом принципе в 15-м томе Большой Советской Энциклопедии, изданном в 1974 году: «...принцип Маха продолжает широко привлекаться в теоретических работах, ставящих целью выяснение строения и свойств Вселенной в целом; при этом проблема его согласования с выводами космологии, исходящей как из общей теории относительности Эйнштейна, так и из других теорий тяготения, сталкивается с серьёзными противоречиями, наводящими на мысль, что принцип Маха либо неверен, либо непроверяем экспериментально» [19;с.519].

А вот что написано по этому поводу в Берклеевском курсе физики: «Существование инерциальных систем отсчёта приводит к сложному вопросу, остающемуся без ответа: какое влияние оказывает вся прочая материя во Вселенной на опыт, производимый в лаборатории на земле?» [12;с.81]. И далее: «...точка зрения о том, что имеет значение только ускорение относительно неподвижных звезд, представляет собой гипотезу, обычно называемую принципом Маха. Хотя не имеется ни экспериментального подтверждения, ни опровержения этой точки зрения, некоторые физики, включая Эйнштейна, нашли, что этот принцип а priori представляет интерес. Другие физики придерживаются противоположного мнения. Этот вопрос имеет значение для теоретической космологии. Если считать, что среднее движение всей остальной части Вселенной влияет на состояние любой одиночной частицы, то возникает целый ряд, связанных с этим вопросов, и путей к ответу на них пока не видно. Имеются ли какие-либо другие взаимные связи между свойствами одиночной частицы и состоянием остальной части Вселенной? Изменится ли заряд электрона или его масса или

энергия взаимодействия между нуклонами, если бы как-то изменилось число частиц во Вселенной или плотность их распределения? До настоящего времени нет ответа на этот глубокий вопрос о соотношении между далёкой Вселенной и свойствами отдельных частиц» [12;с.82].

Таким образом, в настоящее время неизвестно, справедлив или нет принцип Маха. Не ясно также, как проверить его экспериментально.

Тем не менее, всё-таки существует одно экспериментальное свидетельство в пользу принципа Маха. Это факт равенства нулю угловой скорости вращения Вселенной, который установлен с высокой степенью точности (по крайней мере, период вращения Вселенной больше чем  $10^{17}$  лет) в опытах по измерению анизотропии реликтового излучения [20,21]. С точки зрения теории гравитации Ньютона (также как и с точки зрения общей теории относительности) этот факт является невероятной случайностью. А из принципа Маха сразу следует, что Вселенная не может вращаться относительно инерциальной системы отсчёта, потому что в этом случае инерциальные системы отсчёта вращались бы вместе с ней.

Следует также отметить, что принцип Маха был выдвинут в конце девятнадцатого века и поэтому сформулирован в рамках классической механики Ньютона. А в двадцатом веке появились такие фундаментальные разделы физики, как теория относительности и квантовая механика. Поэтому чтобы найти место принципу Маха в современной физике, нужно учесть достижения как теории относительности, так и квантовой механики.

Давайте сейчас рассмотрим основы этих теорий. А затем, во 2-й главе снова вернёмся к обсуждению принципа Маха и посмотрим, какие выводы должны вытекать из него.

## § 1.7. Специальная теория относительности

Основой специальной теории относительности является принцип постоянства скорости света. Смысл его в том, что величина скорости света не зависит от движения наблюдателя.

*Мы можем двигаться с любой скоростью навстречу свету или, наоборот, в противоположном направлении – в любом случае свет будет пронесётся мимо нас с одной и той же скоростью – 300.000 км/с!*

И это – экспериментальный факт.

В начале двадцатого века многие учёные просто отказывались в это поверить. Загадку решил никому не известный в то время молодой человек Альберт Эйнштейн.

До Эйнштейна негласно подразумевалось, что скорость течения времени всегда и везде одинакова. Поэтому было непонятно, каким образом скорость света может оставаться одной и той же в разных системах отсчёта.

Эйнштейн догадался, что время в движущейся системе отсчёта будет течь по-другому. Причём, скорость течения времени изменится таким образом, чтобы скорость света в ней оставалась той же самой! Поэтому Эйнштейн принял в качестве нового закона то, что скорость света одинакова во всех системах отсчёта. И, исходя из этого, рассчитал, как будет преобразовываться время и расстояние при переходе из одной системы отсчёта в другую.

*Итак, масштаб времени и расстояния в движущейся системе отсчёта изменяется всегда таким образом, чтобы свет двигался относительно неё со скоростью 300.000 км/с.*

Здесь можно сделать следующее замечание. Эйнштейн догадался, что при переходе из одной системы отсчёта в другую будет меняться пространственно-временной масштаб, а скорость света – оставаться неизменной. Но он не объяснил, почему так происходит. Почему именно скорость света (скорость в 300.000 км/с) имеет такую привилегию в физическом мире, что она не зависит от скорости движения системы отсчёта.

Ответ на вопрос, почему скорость света не зависит от движения наблюдателя, мы найдём во второй главе.

Закон, по которому преобразуется время и расстояние при переходе из одной системы отсчёта в другую, называется преобразованиями Лоренца. Преобразования названы в честь Лоренца, так как он их открыл раньше Эйнштейна, исследуя

совершенно другой раздел физики (он нашёл преобразования, при которых уравнения Максвелла остаются инвариантными).

Суть их в том, что с точки зрения неподвижной системы отсчёта, время в движущейся системе отсчёта течёт медленнее в  $\gamma$  раз, а длины всех тел сокращаются в направлении движения также в  $\gamma$  раз. Где  $\gamma$  – следующая величина:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (1.19)$$

Здесь  $V$  – скорость движения системы отсчёта, а  $c$  – скорость света.

При этом необходимо подчеркнуть, что с физической точки зрения обе системы отсчёта (и “неподвижная” и “движущаяся”) абсолютно равноправны. И если мы будем находиться в движущейся системе отсчёта, то с нашей точки зрения будет двигаться “неподвижная” система отсчёта, и мы обнаружим, что уже в ней время замедляется в  $\gamma$  раз, а длины всех тел сокращаются в  $\gamma$  раз.

Как видно из уравнения (1.19), если  $V \ll c$ , то значение  $\gamma$  практически равно единице. А все релятивистские эффекты (сокращение длины, замедление времени) существенны лишь при околосветовых скоростях.

Итак, в теории относительности (в отличие от классической механики) и время, и расстояние изменяются при переходе из одной системы отсчёта в другую. Тем не менее, в теории относительности всё-таки существует величина, которая остаётся одной и той же во всех инерциальных системах отсчёта. Это интервал  $s$  между событиями. По определению квадрат интервала между событием, имевшим место в точке  $(x_1, y_1, z_1)$  в момент времени  $t_1$ , и событием, имевшим место в точке  $(x_2, y_2, z_2)$  в момент времени  $t_2$ , равен:

$$s^2 = c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2 \quad (1.20)$$

Исходя из того, что величина скорости света будет одной и той же во всех инерциальных системах отсчёта, нетрудно показать,



что и величина квадрата интервала будет одной и той же во всех инерциальных системах отсчёта [5;§2].

С математической точки зрения интервал можно рассматривать как расстояние между двумя точками в воображаемом четырёхмерном пространстве (которое представляет собой обычное трёхмерное пространство, дополненное временной координатой, умноженной на скорость света  $ct$ ). Геометрия такого четырёхмерного пространства называется псевдоевклидовой, так как она похожа на обычную евклидову геометрию, в которой квадрат расстояния  $r$  между двумя точками равен:

$$r^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2$$

## § 1.8. Масса и энергия

Под действием силы  $F$  тело массы  $m$  приобретает ускорение  $a = F/m$ . Но ускорение тела будет разным в разных системах отсчёта (так как масштаб времени и расстояния разный в разных системах отсчёта). Следовательно, и инертная масса тела (как мера сопротивления тела ускорению) будет разной в разных системах отсчёта. Используя преобразования Лоренца, Эйнштейн пришёл к выводу, что инертная масса тела  $m$  будет изменяться в зависимости от скорости тела  $V$  следующим образом:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (1.21)$$

здесь  $m_0$  – масса покоящегося тела.

Так как масса тела изменяется в зависимости от скорости тела, то Второй закон Ньютона в своём обычном виде (1.2) уже неприменим. Тем не менее, Второй закон Ньютона остаётся справедливым и в специальной теории относительности, если его представить в виде [7;с.264]:

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{V})}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{m_0 \vec{V}}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \right)$$

Как видно из уравнения (1.21), при увеличении скорости тела его масса (инерция) возрастает. При этом часть энергии, направленной на ускорение тела, расходуется на увеличение массы тела. Иначе говоря, энергия может превращаться в массу, и наоборот. Поэтому Эйнштейн пришёл к выводу, что любая энергия обладает инертной массой, а любая инертная масса потенциально содержит в себе энергию.

Вот знаменитая формула Эйнштейна, которая связывает массу тела  $m$  с его полной энергией  $E$ :

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (1.22)$$

В общем случае полная энергия любого физического объекта (твёрдого тела, элементарной частицы, электромагнитного излучения и т. д.) будет равна:

$$E = m_{in} c^2 \quad (1.23)$$

где  $m_{in}$  — инертная масса данного объекта. Полная энергия покоящегося тела  $E_0$ , соответственно, будет равна:

$$E_0 = m_0 c^2 \quad (1.24)$$

Из этой формулы, например, следует, что полная энергия тела массой в 1 кг примерно равна 100 000 000 000 000 000 Дж!

При этом возникает естественный вопрос, на который в рамках теории относительности ответа нет. Почему масса обладает такой колоссальной энергией? Ответ на этот вопрос мы найдём в третьей главе.

## § 1.9. Общая теория относительности

В теории тяготения Ньютона предполагается, что взаимодействие между телами происходит мгновенно. Однако после создания специальной теории относительности стало ясно, что любое взаимодействие передаётся с конечной скоростью.

Таким образом, появилась необходимость видоизменить уравнения тяготения Ньютона.

Кроме того, в теории тяготения Ньютона предполагается, что гравитационная и инертная массы тела равны. Это видно хотя бы потому, что одна и та же масса входит и в Закон Всемирного тяготения (1.1) и во Второй закон Ньютона (1.2). Но из специальной теории относительности следует, что инертная масса тела возрастает с возрастанием его скорости. Поэтому естественным образом возникает следующий вопрос: возрастает ли гравитационная масса тела с возрастанием скорости тела?

Точность экспериментов во времена Эйнштейна не позволяла дать однозначный ответ на этот вопрос. Тем не менее, Эйнштейн предположил, что и в релятивистском случае гравитационная и инертная массы тела будут равны [1;с.167]. И оказался прав.

Используя равенство инертной и гравитационной масс, Эйнштейн сумел обобщить специальную теорию относительности на случай гравитационного поля и построил теорию гравитации – общую теорию относительности. Подробнее мы обсудим общую теорию относительности в 4-й главе.

В настоящее время, благодаря многочисленным экспериментам установлено [18,т.5;с.192], что инертная  $m_{in}$  и гравитационная  $m_{gr}$  массы тела равны с очень высокой степенью

точности:  $\left| \frac{m_{in}}{m_{gr}} - 1 \right| < 10^{-12}$ . Поэтому общепринято, что инертная

масса тела в точности равна его гравитационной массе:

$$m_{in} = m_{gr} \quad (1.25)$$

Но теоретического обоснования это равенство не имеет. То есть на сегодняшний день не известно, *почему* инертная масса тела всегда равна гравитационной массе. Теоретическое обоснование равенства (1.25) мы найдём в 3-й главс.

## § 1.10. Квантовая механика

Теория относительности внесла существенные изменения в классическую картину мира. Но всё-таки подлинную революцию в физике произвела именно квантовая механика.

Квантовая механика «основана на представлениях о движении, принципиально отличных от представлений классической механики. В квантовой механике не существует понятия траектории частиц. Это обстоятельство составляет содержание так называемого *принципа неопределённости* – одного из основных принципов квантовой механики, открытого Гейзенбергом» [6, с.14].

Электрон (или любой другой квантовый объект) движется не по непрерывной линии (траектории), а как-то иначе. В каждый момент времени электрон не имеет ни определённого местоположения, ни определённой скорости. «Если в результате измерения электрон получил определённые координаты, то при этом он вообще не обладает никакой определённой скоростью. Наоборот, обладая определённой скоростью, электрон не может иметь определённого местоположения в пространстве» [6, с.17].

Как же он движется?

Движение электрона (как и движение любого другого квантового объекта) описывается комплексной волновой  $\Psi$ -функцией. В общем случае для одного электрона волновая  $\Psi$ -функция зависит от четырёх переменных – это три пространственные координаты и время. Допустим, мы хотим узнать, находится ли электрон в данный момент времени  $t_0$  в данной точке пространства  $(x_0; y_0; z_0)$ . Если известна волновая функция электрона, то ответ такой: в момент времени  $t_0$  плотность вероятности  $\rho_W$  обнаружить электрон в точке  $(x_0; y_0; z_0)$  равна квадрату модуля волновой функции:

$$\rho_W = |\Psi(t_0; x_0; y_0; z_0)|^2 \quad (1.26)$$

Таким образом, квантовая механика, в отличие от классической, даёт только вероятностное описание движения.

В общем случае неопределённость в движении электрона можно охарактеризовать, во-первых, неопределённостью в его местоположении ( $\Delta x; \Delta y; \Delta z$ ), а во-вторых, неопределённостью в его импульсе ( $\Delta p_x; \Delta p_y; \Delta p_z$ ).

Так вот, для электрона (или любого другого квантового объекта) *всегда* выполняются следующие неравенства [6, с.68]:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar/2, \quad \Delta y \Delta p_y \geq \hbar/2, \quad \Delta z \Delta p_z \geq \hbar/2 \quad (1.27)$$

где  $\hbar \approx 1,055 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка. Эти неравенства, или как их иначе называют «соотношения неопределённостей», были установлены Гейзенбергом в 1927 году.

Иногда можно услышать мнение (кстати, весьма распространённое), что электрон движется по вполне определённой траектории. И в каждый момент времени находится в определённой точке пространства. Просто мы не знаем, где он находится. А когда мы хотим узнать его местоположение при помощи какого-нибудь физического прибора, то тем самым воздействуем на электрон, и в результате теряем возможность предсказать его дальнейшее движение. С этой точки зрения соотношения неопределённостей Гейзенберга отражают лишь *наше* незнание истинной траектории движения.

Это не так. Совершенно не важно, знаем ли мы, где находится электрон или не знаем. В любом случае движение электрона *принципиально* отличается от движения, скажем, камня. Дифракция электронов на кристалле – хорошо известный экспериментальный факт. Но можно сколько угодно кидать камни случайным образом через открытые окна – никакой интерференционной картины при этом не будет. Очевидно, что наше незнание местонахождения электрона не может быть причиной его необычного поведения.

Вот, например, что писал о необычном поведении квантовых объектов Ричард Фейнман: «Поведение тела очень малого размера не похоже ни на что, с чем вы повседневно сталкиваетесь. Эти тела не ведут себя ни как волны, ни как частицы, ни как облака, или бильярдные шары, или грузы, подвешенные на пружинах, – словом, они не похожи ни на что из

того, что вам хоть когда-нибудь приходилось видеть» [8;с.202]. И далее: «Раз поведение атомов так не похоже на наш обыденный опыт, то к нему очень трудно привыкнуть. И новичку в науке, и опытному физику – всем оно кажется своеобразным и туманным. Даже большие учёные не понимают его настолько, как им хотелось бы, и совершенно естественно, потому что весь непосредственный опыт человека, вся его интуиция – всё это обращено к крупным телам. Мы знаем, что будет с большим предметом; но именно так мельчайшие тельца и не поступают» [8;с.203].

*Итак, движение частиц в микромире принципиально отличается от движения макроскопических тел. В микромире частицы движутся не по непрерывной траектории. В их движении есть неопределённость, из-за которой движение частиц носит случайный и непредсказуемый характер.*

Мы ещё вернёмся к странному поведению квантовых объектов в 5-й главе, которая целиком посвящена описанию квантово-механических парадоксов. А в 6-й главе будет предложена новая модель движения квантового объекта, наглядно объясняющая эти парадоксы.

## § 1.11. Фундаментальные постоянные

В §1.3 мы высказали предположение о том, что физические законы могут зависеть от величины гравитационного потенциала Вселенной  $\Phi_{Un}$ , то есть зависеть от распределения всей остальной материи во Вселенной. Пока не совсем ясно, что может означать такое предположение. Например, при расширении Вселенной создаваемый ею гравитационный потенциал уменьшается. Какие изменения это может вызвать в физических законах?

С другой стороны, в формулы физических законов входят различные постоянные величины. Например, в закон Всемирного тяготения Ньютона входит гравитационная постоянная; в теории относительности важную роль играет скорость света; в квантовой механике – постоянная Планка и т. д. Так может быть

*фундаментальные физические постоянные как-то зависят от распределения остальной материи во Вселенной?*

Предположения о том, что величины фундаментальных физических констант (скорости света, заряда электрона, гравитационной постоянной, постоянной Планка, постоянной тонкой структуры, массы электрона...) могут изменяться в зависимости от условий эксперимента, не раз высказывались на протяжении двадцатого века. Вот некоторые примеры.

В тридцатых годах двадцатого столетия Пётр Капица создал очень сильные магнитные поля, в десять раз сильнее тех, которые создавали до него. В связи с этим многие учёные советовали ему провести опыты по исследованию влияния сильного магнитного поля на скорость света. Настойчивей всех говорил с ним об этом Альберт Эйнштейн, так как он предполагал, что в сильном магнитном поле величина скорости света может измениться [22;с.317,318].

А вот что писал о постоянстве скорости света сам Эйнштейн: «Мне кажется невероятным, чтобы ход какого-нибудь процесса (например, распространения света в пустоте) можно было бы считать независимым от всех остальных процессов в мире» [1;с.319,320].

В 1999 году в журнале «Physical Review» были опубликованы статьи, в которых обсуждалась гипотеза о том, что на ранней стадии эволюции Вселенной скорость света была существенно больше, чем в настоящее время. По мнению авторов такое предположение позволило бы разрешить многие космологические проблемы [23,24].

Как уже отмечалось в § 1.4, Поль Дирак в своё время выдвинул гипотезу о том, что гравитационная постоянная может уменьшаться с течением времени. Он изложил это предположение в своей лекции «Космология и гравитационная постоянная» [25;с.178-188]. Ричард Фейнман возражал ему в своих лекциях по физике: «Вот один из способов проверить эту мысль. Зададим вопрос: что при этом должно было измениться за последние  $10^9$  лет (время появления жизни на Земле), то есть за  $1/10$  возраста Вселенной? Оказывается, что если рассмотреть

структуру Солнца, – то при росте тяжести на 10% Солнце оказалось бы не на 10% ярче, а значительно больше: яркость его возросла бы как *шестая степень* постоянной тяготения! Можно подсчитать и то, на сколько при таком изменении тяжести Земля приблизится к Солнцу. В итоге выясняется, что Земля стала бы более чем на  $100^\circ$  горячее и, следовательно, вся вода из морей превратилась бы в пар. Поэтому мы сейчас *не верим*, что постоянная тяготения изменяется по мере того, как мир стареет. Всё же приведённый нами аргумент не очень убедителен, и вопрос до конца не выяснен» [7;с.139].

По современным данным [18,т.5;с.193]:  $\left| \frac{dG}{dt} \cdot \frac{1}{G} \right| < 10^{-11} \text{ лет}^{-1}$

Роберт Дикке считал, что огромные массы Вселенной могут как-то влиять на процессы в лаборатории. В связи с этим он подробно обсуждает вопрос о возможной зависимости фундаментальных констант от распределения вещества во Вселенной [26;с.31-42].

Однако, следует отметить, что существующие физические наблюдения (например, данные по тонкой структуре расщепления спектральных линий квазаров и радиогалактик) позволяют утверждать, что даже в далёком прошлом величина постоянной тонкой структуры  $\alpha$  существенно не отличалась от современного значения [27,т.3;с.303]:

$$\alpha = \frac{e^2}{c\hbar} \approx \frac{1}{137}$$

где  $e$  – величина заряда электрона.

## § 1.12. Вопросы современной физики

В заключение этой главы перечислим наиболее важные вопросы современной физики, которые мы уже обсуждали ранее.

1. Влияет или нет распределение всей материи во Вселенной (например, величина гравитационного потенциала  $\Phi_{Un}$ ) на протекание физических процессов?



2. Является ли случайным тот факт, что квадрат скорости света равен (в пределах погрешности наблюдений) гравитационному потенциалу Вселенной:

$$c^2 = -\Phi_{Un}$$

3. Связано или нет существование инерциальных систем отсчёта с удалёнными массами Вселенной?

4. Почему при переходе из одной системы отсчёта в другую именно скорость света остаётся постоянной величиной?

5. Откуда в покоящемся теле взялась такая колоссальная энергия:

$$E_0 = m_0 c^2$$

6. Почему инертная масса тела с очень высокой точностью (точнее, чем  $10^{-12}$ ) равна его гравитационной массе?

7. Откуда взялась неопределённость в микромире, из-за которой движение субатомных частиц носит случайный и непредсказуемый характер?

8. Существует или нет какая-либо связь между гравитационным взаимодействием и принципом неопределённости?

Конечно, в современной физике существуют и другие вопросы, на которые пока нет ответа. В этом же параграфе перечислены те вопросы, на которые будут даны ответы в книге. *И из каждого ответа будут вытекать принципиально новые следствия, истинность которых можно будет проверить экспериментально.*

Можно также отметить следующее. В этом параграфе перечислено восемь вопросов. Но реально их меньше. Потому что как будет видно в дальнейшем, эти вопросы взаимосвязаны. Но об этом в следующих главах.

## Глава 2

# Построение Новой Теории

Для того чтобы решить проблему, связанную с принципом Маха, необходимо построить на его основе теорию, а затем рассмотреть следствия, вытекающие из неё. Экспериментальная проверка таких следствий позволит выяснить, верен или нет принцип Маха.

### § 2.1. Постановка задачи

Итак, наша цель – построить *новую* физическую теорию, которая будет удовлетворять принципу Маха. Само собой разумеется, что новая теория должна также не противоречить и всем известным в настоящее время экспериментальным данным.

А что, собственно говоря, означает утверждение: теория удовлетворяет принципу Маха? Давайте разберём этот вопрос.

Принцип Маха утверждает, что движение тела по инерции как-то связано с неподвижными звёздами. Интуитивно это утверждение можно принять. Но какой в нём содержится *физический смысл*, пока не совсем ясно.

Новая теория должна раскрыть *физический смысл* принципа Маха. Для этого она должна объяснить, *как именно* влияют неподвижные звёзды на движение тела по инерции. Как влияет на движение тела *каждая отдельно взятая звезда*, например Солнце? Новая теория должна быть такой, чтобы из неё можно было количественно рассчитать вклад от каждой звезды в движение тела по инерции. А значит, нам нужно получить математическую формулу, которая позволит рассчитать влияние каждой звезды на закон инерции. *И чтобы из этой формулы*

было ясно видно, что тело движется по инерции только благодаря совместным усилиям всех неподвижных звёзд.

Из новой теории должно также следовать, что на достаточном удалении от всех звёзд (больших масс) закон инерции действовать не будет. Пока не ясно, что означает фраза: «закон инерции действовать не будет». Так вот, новая теория должна раскрыть смысл и этой фразы.

Рассмотрим конкретный пример. Пусть два космических корабля летят меж звёзд по параллельным курсам с одинаковыми скоростями и выключенными двигателями. При этом один корабль вращается вокруг своей оси, а другой – не вращается. То есть первый корабль представляет собой неинерциальную систему отсчёта, а второй – инерциальную. С точки зрения принципа Маха различие между кораблями состоит *только в том*, что один из них *вращается относительно звёзд*, а другой – не вращается.

Предположим, что через какой-то длительный промежуток времени эти два корабля улетели настолько далеко от всех звёзд, что влиянием звёзд можно пренебречь. Конечно, на практике такое вряд ли возможно. Но теоретически, то есть мысленно, представить это нетрудно.

И если принцип Маха верен, то в этом случае *никакого физического различия* между кораблями не будет. То есть *законы движения станут одни и те же на обоих кораблях*.

А такое возможно только в том случае, если по мере удаления от всех звёзд будет каким-то образом “стираться” *физическое различие* между инерциальной и неинерциальной системами отсчёта.

Учитывая всё выше сказанное, можно сделать вывод, что задача построения новой физической теории на основе принципа Маха состоит в следующем. *Нужно написать новое уравнение, учитывающее влияние каждой звезды на закон инерции. И чтобы из этого уравнения следовало, что при удалении от всех звёзд будет стираться физическое различие между инерциальной и неинерциальной системами отсчёта. А также следовало, что на*

достаточном удалении от всех звёзд закон инерции не будет действовать.

Вполне возможно, что из нового уравнения будут вытекать принципиально новые следствия. Проверив эти следствия экспериментально, можно будет узнать, верен или нет принцип Маха.

## § 2.2. Эксперимент за пределами Вселенной

Для того чтобы понять физический смысл принципа Маха, нам следует провести эксперимент за пределами Вселенной. В этом эксперименте мы будем наблюдать, как будут двигаться пробные тела в том случае, когда закон инерции не определён.

Конечно, реально такой эксперимент невозможно осуществить. Невозможно улететь настолько далеко от всех звёзд, чтобы их влиянием можно было пренебречь. Но ничто не мешает нам провести этот эксперимент мысленно. Здесь может, конечно, возникнуть вопрос: а не бессмысленно ли рассуждать об эксперименте, если на практике он невозможен? Всё зависит от поставленной цели. Цель данного мысленного эксперимента – понять принцип Маха. К тому же это просто интересно.

Итак, предположим, что те самые два гипотетических космических корабля из предыдущего параграфа достигли, наконец, края Вселенной – той самой области пространства, настолько удалённой от всех больших масс Вселенной, что их воздействием уже можно пренебречь. То есть в этой области гравитационный потенциал Вселенной  $\Phi_{Um}$  практически равен нулю.

Пусть, например, космонавт одного из кораблей вышел в окружающее пространство. Он держит в руках кирпич и хочет его бросить. С каким ускорением полетит кирпич? Если исходить из Второго закона Ньютона, то ускорение кирпича  $a$  будет равно:  $a = F/m$ . Здесь  $F$  – сила, с которой космонавт бросит кирпич,  $m$  – инертная масса кирпича.

Но ведь кирпич оказывает сопротивление ускорению только когда ускоряется относительно неподвижных звёзд.

Именно это утверждает принцип Маха. А данный кирпич находится *так далеко* от всех звёзд, что их воздействием на него можно пренебречь. Следовательно, кирпич не будет оказывать сопротивление ускорению, то есть потеряет свою инерцию. Иначе говоря, за пределами Вселенной инертная масса кирпича  $m$  будет равна нулю:

$$m = 0$$

В § 1.6 мы уже приводили предположение Эйнштейна о том, что на достаточном удалении от всех масс Вселенной инерция тела должна уменьшиться до нуля. Таким образом, ускорение кирпича будет равно:  $a = \frac{F}{m} = \frac{F}{0} = \infty$ . Получается, кирпич полетит с бесконечным ускорением! Что-то здесь не так. А если на кирпич не действует сила, то с каким ускорением он тогда будет двигаться? В этом случае он будет двигаться с ускорением:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{0}{0} = ?$$

Но если ноль поделить на ноль, то может получиться любое число. Такая арифметическая операция просто не определена. Выходит, кирпич будет двигаться с неопределённым ускорением? Но, значит, тогда он будет двигаться и с неопределённой скоростью и, что самое неприятное, в неопределённом направлении. Это означает, что кирпич можно будет обнаружить в любом месте пространства с равной вероятностью.

Итак, исходя из принципа Маха, мы пришли к выводу, что на достаточно большом удалении от всех больших масс Вселенной закон движения пробного тела (кирпича) будет неопределён.

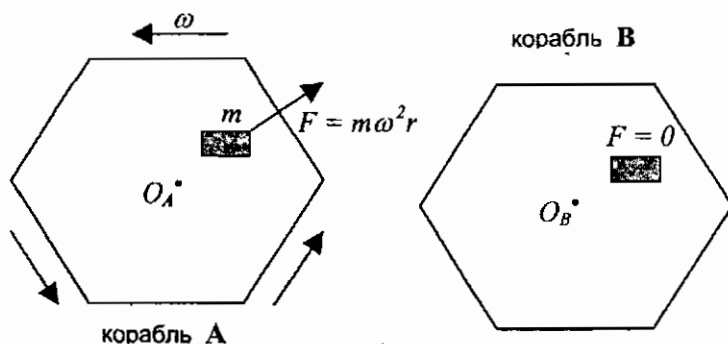
### § 2.3. Виртуальный кирпич

А теперь давайте посмотрим, как будет выглядеть движение кирпича с точки зрения каждого из кораблей. Напомним, что один из двух кораблей (назовём его А) вращается

относительно неподвижных звёзд, а другой корабль (назовём его **В**) – не вращается.

Когда корабли ещё находились внутри Вселенной, то во вращающемся корабле **А** действовали центробежные силы. И если бы во вращающемся корабле космонавт выпустил из рук кирпич, то кирпич был бы отброшен центробежной силой к наружной стенке корабля (см. рис.1). А если бы выпустил кирпич из рук космонавт не вращающегося корабля, то этот кирпич “парил” бы возле космонавта.

С точки зрения принципа Маха во вращающемся корабле действовали центробежные силы *только* благодаря тому, что корабль вращался относительно неподвижных звёзд. Именно воздействие звёзд каким-то образом и вызывало центробежные силы во вращающемся корабле.



**Рис.1.** Схема, изображающая корабли. Оба корабля ещё находятся внутри Вселенной, в окружении звёзд. Корабль **А** вращается относительно неподвижных звёзд с угловой скоростью  $\omega$  вокруг своего центра масс – точки  $O_A$ . Благодаря воздействию звёзд во вращающемся корабле **А** действуют центробежные силы. На любое тело массы  $m$ , находящееся в корабле **А**, действует центробежная сила  $F = m\omega^2 r$ , где  $r$  – расстояние от тела до оси вращения (точка  $O_A$ ).

А на корабле **В** все тела находятся в состоянии невесомости.

Ситуация существенно изменилась, когда корабли вылетели за пределы Вселенной, то есть удалились настолько далеко от всех звёзд, что воздействием звёзд на корабли уже можно было пренебречь (они удалились в место, настолько далёкое от всех масс Вселенной, что в этом месте гравитационный потенциал Вселенной  $\Phi_{Un}$  практически равен нулю). Поэтому центробежные силы во вращающемся корабле перестали действовать.

Таким образом, корабль А продолжает вращаться относительно неподвижных звёзд. Но центробежные силы в нём уже не действуют, так как звёзды находятся слишком далеко, и их воздействие недостаточно для того, чтобы вызвать центробежные силы. И если теперь космонавт вращающегося корабля выпустит из рук кирпич, то кирпич будет парить возле космонавта. Ведь центробежные силы уже не действуют!

Итак, кирпич во вращающемся корабле должен оставаться всё время неподвижным относительно корабля. То есть он будет вращаться вместе с кораблём А относительно его оси.

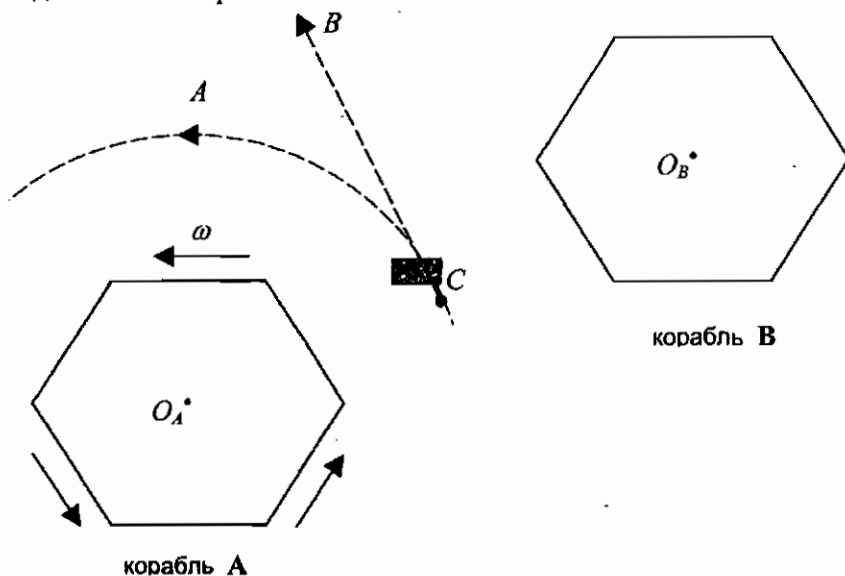
А теперь предположим, что космонавт во вращающемся корабле просунул руку через иллюминатор в окружающее пространство и выпустил из руки кирпич (смотри рис. 2). Так как центробежных сил нет, то кирпич должен оставаться всё время неподвижным относительно корабля А, вращаясь вместе с ним вокруг точки  $O_A$ . Поэтому кирпич должен двигаться по окружности с центром в точке  $O_A$ , ведь только при таком движении он останется неподвижным относительно корабля.

Но с другой стороны, когда космонавт корабля А выпустил из рук кирпич, то кирпич находился в покое относительно корабля А. А это значит, что он двигался относительно корабля В со скоростью  $V$ , равной:

$$V = \omega r$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения корабля А, а  $r$  – расстояние от кирпича до точки  $O_A$  (ось вращения корабля А). И так как на кирпич никакие силы не действуют, то он должен также двигаться равномерно и прямолинейно относительно корабля В. То есть должен двигаться по прямой  $CB$ .

Получается, что, с одной стороны, кирпич должен двигаться по окружности, а, с другой стороны, он должен двигаться по прямой.



**Рис. 2.** Схема, изображающая корабли, когда они уже вылетели за пределы Вселенной. Воздействием звёзд можно полностью пренебречь, и поэтому во вращающемся корабле А центробежные силы не действуют.

Космонавт корабля А оставил в окружающем пространстве кирпич (точка С). С одной стороны, кирпич должен оставаться всё время неподвижным относительно корабля А, так как центробежные силы на него не действуют. И, следовательно, он должен двигаться по окружности с центром в точке  $O_A$  (по дуге СА).

Но с другой стороны, когда космонавт оставил кирпич в открытом пространстве, кирпич двигался с некоторой скоростью относительно корабля В. Но ведь в системе отсчёта, связанной с кораблём В, центробежные силы тоже не действуют. Поэтому кирпич должен двигаться равномерно и прямолинейно также и относительно корабля В, то есть он должен двигаться также и по прямой СВ.



Иначе говоря, один и тот же кирпич должен одновременно двигаться в разных направлениях! И через некоторое время оказаться сразу в разных точках пространства! Может ли кирпич так двигаться?

Чтобы лучше понять ответ на этот вопрос, давайте повторим вкратце наши рассуждения. Между инерциальной и неинерциальной системами отсчёта существует принципиальная разница. В инерциальной системе отсчёта выполняется закон инерции, а в неинерциальной системе отсчёта – не выполняется. В инерциальной системе отсчёта свет движется по прямой, а в неинерциальной системе отсчёта путь света искривлён. Можно сказать, что существует некоторая асимметрия между разными системами отсчёта. В чём причина этой асимметрии?

Принцип Маха утверждает, что физической причиной такой асимметрии являются звёзды. Например, корабль А вращается относительно звёзд. И только благодаря этому (то есть какому-то, пока не выясненному, воздействию звёзд) в корабле А возникают центробежные силы.

Но когда корабли вылетели за пределы Вселенной так далеко, что воздействием звёзд можно полностью пренебречь, то ситуация существенно изменилась. *Теперь оба корабля с физической точки зрения абсолютно равноправны. Поэтому, если кирпич будет двигаться равномерно и прямолинейно относительно корабля В, то он также должен двигаться равномерно и прямолинейно относительно корабля А.*

Иначе говоря, один и тот же кирпич должен двигаться в разных направлениях *одновременно*. Может ли он так двигаться? Может, но только в том случае, если за пределами Вселенной кирпич по какой-либо причине превратится в волну.

При каких условиях такое превращение возможно? Ответ следующий. С точки зрения квантовой механики любое тело обладает некоторой неопределённостью в движении и, следовательно, волновыми свойствами. Эта неопределённость в движении характеризуется очень маленькой величиной – величиной постоянной Планка. Именно поэтому волновые свойства кирпича в обычных условиях практически не

проявляются. Но если неопределённость в движении тел за пределами Вселенной значительно возрастёт (значительно возрастёт величина постоянной Планка), то волновые свойства кирпича станут наблюдаемы. И кирпич запросто сможет пролететь по различным путям одновременно. Как делает это электрон при обычных условиях (парадоксальному поведению квантовых объектов будет целиком посвящена 5-я глава).

Учитывая всё вышесказанное, можно сделать следующий вывод. В соответствии с требованием принципа Маха за пределами Вселенной – где звёзды не оказывают своего воздействия – Второй закон Ньютона будет *неопределён* (то есть не будет определена система отсчёта, относительно которой измеряется ускорение, которое содержится в формуле этого закона). И поэтому там *тела будут двигаться с неопределёнными ускорениями*. Вследствие этого *скорости тел и направления их движения будут также неопределёнными*.

Но ведь и элементарные частицы, из которых состоят тела, также будут двигаться с неопределёнными скоростями и в неопределённых направлениях. *Поэтому все макроскопические тела распадутся на элементарные частицы*. Такая же участь постигла бы и наши два корабля, будь они не гипотетическими, а реальными.

*Итак, за пределами Вселенной все макроскопические тела распадутся на элементарные частицы, которые будут двигаться с неопределёнными ускорениями и скоростями в неопределённых направлениях. Их движение будет носить абсолютно случайный и непредсказуемый характер.*

Можно ли в таких условиях создать какую-либо физическую систему отсчёта? Можно ли как-то измерять в таких условиях расстояния? Можно ли найти какой-нибудь периодический процесс, длительность которого можно было бы взять в качестве единицы времени? Очевидно, что нет.

Но если за пределами Вселенной невозможно измерить ни время, ни расстояние, то имеет ли какой-нибудь смысл говорить об их существовании? По-видимому, тоже нет.

Можно отметить, что похожие мысли по поводу принципа Маха высказывал Паули: «В совершенно пустом пространстве вообще не может быть никакого гравитационного поля; в этом случае не было бы возможно ни распространение света, ни существование масштабов и часов. С этим связано также выполнение постулата относительности инерции» [49;с.253]. К сожалению, эти мысли остались у Паули неразработанными.

*Итак, на достаточно большом удалении от всех масс Вселенной и время и расстояние теряют физический смысл.*

Такое необычное состояние пространства мы будем в дальнейшем называть Хаосом. Можно отметить, что в современной физике существует понятие хаоса как меры неупорядоченного движения тел. А вводимое нами понятие Хаоса относится к *состоянию пространства*, в котором в *принципе* невозможно какое-либо упорядоченное движение.

## § 2.4. набросок новой картины Мира

Учитывая сказанное в предыдущем параграфе, можно нарисовать контуры новой картины Мира.

На достаточном удалении от всех больших масс Вселенной, где их влиянием можно пренебречь (на таком удалении, где гравитационный потенциал, создаваемый всеми массами Вселенной  $\Phi_{Un}$ , практически равен нулю), законы движения тел будут неопределёнными. Элементарные частицы будут двигаться там совершенно случайным образом, с неопределёнными скоростями и ускорениями. Поэтому там не могут существовать ни макроскопические тела, ни даже атомы.

*Понятие системы отсчёта (в том числе и инерциальной), а также время и расстояние при таких условиях теряют физический смысл.*

А по мере приближения к большим массам Вселенной (то есть по мере того, как будет увеличиваться глубина гравитационного потенциала  $\Phi_{Un}$ , создаваемого ими) воздействие этих больших масс начнёт возрастать. Это проявится в том, что большие массы Вселенной начнут оказывать всё более сильное сопротивление хаотическому и неопределённому ускорению

элементарных частиц. В результате такого сдерживающего воздействия неопределённость в движении элементарных частиц станет меньше.

И, наконец, внутри нашей Вселенной благодаря сильному сдерживающему воздействию окружающих звёзд и галактик (это воздействие характеризуется, например, огромной величиной гравитационного потенциала Вселенной:  $\Phi_{Un} \approx -10^{17} \text{ м}^2/\text{с}^2$ ) неопределённость и хаотичность в ускорениях и скоростях элементарных частиц очень мала. Это и приводит к тому, что (в обычных условиях) свободная элементарная частица движется “почти” по прямой линии и “почти” с постоянной скоростью.

И если вышеизложенные предположения об устройстве мироздания верны, то становится ясно, откуда в микромире взялась неопределённость в движении частиц.

*Эта неопределённость есть остаток от хаотичности движения элементарных частиц после наложения ограничивающего воздействия огромной массы Вселенной.*

Именно благодаря сдерживающему воздействию огромных масс Вселенной в движении элементарных частиц появляется определённый порядок. И только благодаря определённому порядку в движении частицы и могут образовывать сложные и устойчивые объекты, такие как атомы, молекулы и, наконец, макроскопические тела, включая нас с вами.

Итак, огромные массы, заполняющие Вселенную, взаимодействуют между собой и, тем самым, ограничивают свободу и неопределённость в движении друг друга. И в результате в мироздании наблюдается определённый порядок. А законы физики как раз и выражают этот порядок на математическом языке.

Соответственно, перед нами теперь стоит следующая задача. Нам нужно выразить изложенный в этом параграфе набросок новой картины Мира в виде строгих математических формул.

## § 2.5. Необходимое замечание

В следующем параграфе мы сформулируем новый закон природы. И именно этот закон будет фундаментом для построения новой теории. Здесь может возникнуть вопрос: неужели такой сырой материал, который был изложен в предыдущих параграфах этой главы, можно использовать в качестве фундамента новой физической теории?

Во избежание разных недоразумений необходимо сделать следующее замечание. Всё написанное в предыдущих параграфах не имеет никакого отношения к *логическому построению* новой теории. Иначе говоря, при построении новой физической теории мы не будем опираться ни на мысленные эксперименты за пределами Вселенной, ни даже на принцип Маха. И вот почему.

Возьмём, к примеру, принцип Маха. Не существует единого мнения в науке об этом принципе. Не существует даже общепринятой формулировки этого принципа, так как не ясно, какой физический смысл в нём содержится. Что же касается самого Маха, то «здесь физики и астрофизики вынуждены с сожалением констатировать, что Мах слишком часто высказывал лишь весьма расплывчатые и неточные суждения и предположения. Эти несвойственные физике умозрительные построения, не поддающиеся выражению на строгом формально-научном языке или с помощью математических символов, только благодаря Эйнштейну стали предметом длительного всестороннего (и часто разочаровывающего) обсуждения, превратились в действительную, хотя иногда и неприятную проблему, притом проблему чрезвычайно разветвлённую» [15; с.293].

В этой книге мы рассматриваем принцип Маха под одним углом зрения, и далее мы постараемся вложить в него определённый физический смысл. Но кто-нибудь другой имеет полное право рассмотреть принцип Маха под совершенно другим углом зрения и вложить в него совершенно другой смысл. Поэтому чтобы избежать ненужных споров об определениях, мы просто не будем использовать принцип Маха *при логическом построении* новой физической теории. Тем не менее, новая теория будет удовлетворять принципу Маха в том смысле, как

это было раскрыто в § 2.1. Кроме того, из новой теории будет вытекать картина Мира, набросок которой был сделан в § 2.4. Хотя ни этот набросок, ни даже принцип Маха не будут использоваться как материал для *логического построения* новой теории.

В основу новой физической теории мы положим нечто более конкретное, а именно, экспериментальные данные современной астрофизики. Но об этом в следующем параграфе.

## § 2.6. Новый закон природы

Итак, в этом параграфе мы сформулируем новый закон природы. Именно этот закон и будет являться первым шагом для построения новой физической теории.

В качестве экспериментальной базы для формулировки нового закона мы возьмём данные наблюдений современной астрофизики. А именно, современные астрофизические данные о величине средней плотности Вселенной, о скорости её расширения и о её возрасте. На основании этих данных, как было показано в § 1.2, можно сделать следующий вывод.

*Суммарный гравитационный потенциал, создаваемый всеми массами Вселенной  $\Phi_{\text{вс}}$ , примерно равен по модулю квадрату скорости света.*

Такое совпадение двух различных и, казалось бы, совершенно не связанных между собой величин не раз обсуждалось в научной литературе. И в § 1.2 мы уже приводили цитату Фейнмана о том, что подобное равенство является одной из величайших загадок природы. В данной ситуации можно выбрать один из двух путей.

*Путь первый.* Считать подобное равенство случайным совпадением и, следовательно, не делать из него никаких выводов.

*Путь второй.* Принять это равенство за **Новый закон природы** и посмотреть, какие выводы из этого будут следовать.

Таким образом, первый путь несколько не приближает нас к разгадке тайны. А второй путь открывает новые перспективы для её исследования. Поэтому мы пойдём по второму пути.

Итак, мы постулируем *Новый закон природы*, суть которого в том, что *квадрат скорости света всегда и везде равен модулю суммарного гравитационного потенциала Вселенной*:

$$c^2 = |\Phi_{Un}| = -\Phi_{Un} \quad (2.1)$$

Иначе говоря, мы постулируем, что величина скорости света определяется величиной суммарного гравитационного потенциала Вселенной. Здесь может возникнуть следующий вопрос: а какая может быть связь между скоростью света (скоростью распространения электромагнитных колебаний) и гравитацией? Ответ следующий. В § 1.1 мы уже говорили о том, что гравитационное взаимодействие в каждой точке пространства можно охарактеризовать тремя величинами – гравитационным полем, гравитационным потенциалом и, наконец, скоростью распространения гравитационного поля.

Гравитационное поле внутри Вселенной в среднем равно нулю. В то время как и гравитационный потенциал, и скорость распространения гравитационного поля отличны от нуля. Кроме того, квадрат скорости поля и гравитационный потенциал имеют одну и ту же физическую размерность. Более того, насколько позволяют судить данные современных астрофизических наблюдений, эти величины примерно равны между собой.

Поэтому физический смысл Нового закона (2.1) следующий. Скорость распространения гравитационного поля  $V_{grav}$  внутри Вселенной определяется величиной гравитационного потенциала Вселенной  $\Phi_{Un}$ :  $V_{grav}^2 = -\Phi_{Un}$ . Скорость распространения поля является предельно возможной скоростью движения, и именно поэтому фотон, который не имеет массы покоя, движется с такой скоростью:  $c = V_{grav}$ . Получается, что суммарный гравитационный потенциал Вселенной определяет величину скорости распространения гравитационного поля и, следовательно, величину скорости света. Именно это и выражено в Новом законе (2.1).

Однажды Ричард Фейнман читал лекцию о том, как строят догадки и открывают новые физические законы. В этой лекции Фейнман не предложил никакого рецепта для открытия новых законов, но зато он объяснил, как можно отличить истинную гипотезу от ложной. Вот его рассуждения на эту тему: «Вообще говоря, поиск нового закона ведётся следующим образом. Прежде всего о нём догадываются. Затем вычисляют следствия этой догадки и выясняют, что повлечёт за собой этот закон, если окажется, что он справедлив. Затем результаты расчетов сравнивают с тем, что наблюдается в природе, с результатами специальных экспериментов или с нашим опытом, и по результатам таких наблюдений выясняют, так это или не так. Если расчёты расходятся с экспериментальными данными, то закон неправилен. В этом простом утверждении самое зерно науки. Неважно, насколько ты умён, кто автор догадки, известен он или нет – если теория расходится с экспериментом, значит теория неверна. Вот и всё» [11;с.142]. И далее: «Чаще всего узнать, правильна ваша догадка или нет, нетрудно уже после двух-трёх элементарных расчётов, позволяющих убедиться в том, что она не очевидно неправильна. Если вам повезло, это сразу бросается в глаза (по крайней мере, если у вас есть опыт), так как чаще всего приходится не столько добавлять, сколько отбрасывать. Ваша догадка, в сущности, состоит в том, что нечто – очень простое. Если вы не видите сразу же, что это неверно, и если так оказывается проще, чем раньше, – значит, это верно. Правда, простые теории предлагают и неопытные люди или безудержные фантазёры, но здесь сразу ясно, что они неверны, так что это в счёт не идёт. Другие же, например неопытные студенты, высказывают очень сложные догадки, и им кажется, что всё правильно, но я знаю, что это не так, ибо истина всегда оказывается проще, чем можно было бы предположить. Что нам действительно нужно, так это воображение, но воображение в надёжной смирительной рубашке. Нам нужно найти новую точку зрения на мир, которая должна согласовываться со всем, что уже известно, но кое в чём расходится с нашими установившимися представлениями, иначе



это будет не интересно. И расхождения должны соответствовать тому, что происходит в природе» [11;с.157].

Итак, мы постулировали Новый закон природы (2.1), и на его основе будем строить новую физическую теорию. И если вдруг наш Новый закон окажется неверным, то рано или поздно мы должны прийти к противоречию.

## § 2.7. Постоянство скорости света

Величина гравитационного потенциала в разных точках пространства может быть разной. В таком случае, как следует из Нового закона (2.1), скорость света также будет разной в разных точках пространства. Например, вблизи большой массы величина модуля гравитационного потенциала Вселенной увеличится (увеличится глубина вселенского гравитационного океана), и, следовательно, величина скорости света также увеличится.

Иначе говоря, из Нового закона (2.1) следует, что *свет будет ускоряться в гравитационном поле!* А в современной физике скорость света считается абсолютной константой. То есть считается, что величина скорости света остаётся одной и той же *при любых условиях* проведения эксперимента.

Давайте посмотрим на постоянство скорости света с исторической точки зрения. Во времена Ньютона считалось, что свет представляет собой поток частиц. И если бы в то время обнаружили, что свет ускоряется в гравитационном поле, то этот факт совершенно никого бы не удивил. И наоборот, в то время никто бы не поверил, что существуют какие-то особые частицы (фотоны), которые почему-то не ускоряются в гравитационном поле. Ситуация изменилась в двадцатом веке, после создания специальной теории относительности. Но ведь специальная теория относительности совсем не утверждает, что скорость света является абсолютной константой. Она утверждает только то, что величина скорости света *не зависит от движения наблюдателя*. Именно предположение о том, что величина скорости света будет одной и той же в разных системах отсчёта, и лежит в основе специальной теории относительности.

Тот парадоксальный экспериментальный факт, что величина скорости света не зависит от движения наблюдателя, по-видимому, очень сильно поразил воображение современников Эйнштейна. И в результате они решили: раз скорость света не зависит даже от движения наблюдателя, то она вообще ни от чего не зависит. Хотя сам Эйнштейн не верил в то, что скорость света является абсолютной константой (см. его цитату в § 1.11).

К вышесказанному следует также добавить, что *никто не пытался экспериментально проверить, ускоряется свет в гравитационном поле или нет*. Никто, по-видимому, даже не интересовался этим. А если предположить, что величина скорости света определяется величиной гравитационного потенциала Вселенной (2.1), то, по крайней мере, становится ясно, почему скорость света не зависит от движения наблюдателя. Ведь в каждой точке пространства гравитационный потенциал имеет вполне определённую величину, и эта величина совсем не зависит от того, движетесь вы или нет. И раз величина скорости света определяется величиной гравитационного потенциала, то отсюда сразу следует, что величина скорости света, также как и гравитационный потенциал, не зависит от движения наблюдателя.

Итак, во-первых, из Нового закона (2.1) следует, что фотоны будут ускоряться в гравитационном поле. И это не удивительно, ведь известно, что *все* частицы ускоряются в гравитационном поле, и, следовательно, естественно ожидать, что и фотоны также будут ускоряться в гравитационном поле. А для того чтобы утверждать обратное (то есть утверждать, что скорость света не изменяется в гравитационном поле), нужны основания. Но в современной физике на сегодняшний день *нет для этого никаких оснований – ни теоретических, ни экспериментальных*.

Во-вторых, из Нового закона (2.1) видно, что величина скорости света определяется величиной гравитационного потенциала. А из этого следует, что величина скорости света не будет зависеть от движения наблюдателя, потому что величина

гравитационного потенциала *не зависит* от движения наблюдателя. Таким образом, *основной постулат специальной теории относительности является следствием Нового закона.*

## § 2.8. Экспериментальная проверка Нового закона

Из Нового закона (2.1) следует не только то, что свет будет ускоряться в гравитационном поле, но и то, что величина скорости света будет изменяться со временем вместе с изменением величины гравитационного потенциала.

Во-первых, так как наша Вселенная расширяется, то при её расширении величина гравитационного потенциала по модулю будет уменьшаться. Из Нового закона (2.1) следует, что при этом величина скорости света также будет уменьшаться.

Во-вторых, Земля движется вокруг Солнца по эллипсу. Вследствие этого гравитационный потенциал, создаваемый Солнцем на поверхности Земли, изменяется в течение года. Поэтому величина скорости света также должна изменяться в течение года.

С другой стороны, экспериментально установлено, что скорость света в земных условиях есть величина постоянная с точностью до  $1,2 \text{ м/с}$  [18; т.4, с.549]:

$$c = 299.792.458 \pm 1,2 \text{ м/с} \quad (2.2)$$

Из Нового закона (2.1) мы можем рассчитать, *на какую* максимальную величину изменяется скорость света в течение года. И если из Нового закона (2.1) будет следовать, что скорость света изменяется в течение года на величину больше, чем  $1,2 \text{ м/с}$ , скажем, на величину  $10 \text{ м/с}$  или  $1000 \text{ м/с}$ , то это будет означать, что Новый закон (2.1) не верен. Поэтому давайте рассчитаем из Нового закона (2.1), на какую максимальную величину  $\Delta c$  должна изменяться скорость света в течение года.

Расстояние от Земли до Солнца составляет величину  $L = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}$ . При движении Земли вокруг Солнца максимальное изменение этого расстояния равно  $\Delta L = 5 \cdot 10^9 \text{ м}$ . Изменение расстояния  $\Delta L$  между Землёй и Солнцем (напомним, что  $\Delta L \ll L$ )

приводит к тому, что гравитационный потенциал, создаваемый Солнцем на поверхности Земли, изменяется на величину  $\Delta\Phi$ :

$$\Delta\Phi = G \frac{M}{L^2} \Delta L \quad (2.3)$$

где  $M \approx 2 \cdot 10^{30}$  кг – масса Солнца. Изменение гравитационного потенциала  $\Delta\Phi$  вызовет в свою очередь изменение скорости света  $\Delta c$ . Из Нового закона (2.1) нетрудно рассчитать, что в том случае, если  $|\Delta\Phi| \ll |\Phi_{\text{Ун}}|$ , изменение скорости света составит величину:

$$\Delta c = -\Delta\Phi / 2c \quad (2.4)$$

Подставляя  $\Delta\Phi$  из уравнения (2.3) в уравнение (2.4), получим:

$$|\Delta c| = \frac{GM}{2cL^2} \Delta L \quad (2.5)$$

Подставляя в уравнение (2.5) значения величин, получим:

$$|\Delta c| = 0,05 \text{ м/с} \quad (2.6)$$

Итак, из Нового закона (2.1) мы получили, что максимальное изменение скорости света в течение года составляет величину 0,05 м/с. В § 3.5 мы несколько уточним полученный результат. Наибольшее значение скорости света будет зимой, когда Земля ближе всего подходит к Солнцу. А наименьшее, соответственно, летом.

Полученный нами результат показывает, что **Новый закон не противоречит современным экспериментальным данным о постоянстве скорости света**, так как:

$$0,05 \text{ м/с} < 1,2 \text{ м/с}$$

С другой стороны, полученный результат показывает, что **Новый закон можно проверить экспериментально в земных условиях**. Для этого достаточно увеличить точность измерения скорости света на 1–2 порядка. А это сделать не так трудно. И вот почему. Точность, с которой измерена скорость света (2.2) была достигнута ещё в 1976 году! Именно в 1976 году международная комиссия на основании существующих в то время экспериментальных данных установила равенство (2.2) [18; т.4, с.548]. И после этого эксперименты по измерению

скорости света перестали проводиться. И до сих пор, по-видимому, считается нецелесообразным тратить силы и средства на дальнейшее повышение точности измерения скорости света.

Можно отметить, что за последние четверть века произошёл значительный прогресс в технике физического эксперимента. И если бы эксперименты по измерению скорости света не прекратились, то вполне возможно, что к настоящему времени скорость света уже была бы измерена с точностью до  $1\text{ см/с}$ . Также вполне возможно, что в этом случае была бы экспериментально обнаружена вариация скорости света в течение года (эта тема будет продолжена в § 8.1).

Экспериментальная проверка Нового закона (2.1) откроет новые перспективы в исследовании Вселенной. Так как в случае подтверждения Нового закона *откроется возможность измерить скорость расширения Вселенной экспериментально!* (см. § 10.10).

## § 2.9. Постоянная тонкой структуры

Итак, мы постулировали Новый закон природы (2.1):  $c^2 = -\Phi_{U_n}$ . Из этого закона, в частности, следует, что в далёком прошлом (несколько миллиардов лет назад), когда материя во Вселенной находилась в более плотном состоянии, скорость света была существенно выше, чем в настоящее время.

Но как уже отмечалось в § 1.11, даже в далёком прошлом величина постоянной тонкой структуры существенно не отличалась от современного значения. Это, например, следует из анализа данных по тонкой структуре расщепления спектральных линий квазаров. Благодаря тому, что квазары находятся на огромных расстояниях от нас – это миллиарды световых лет, – мы можем исследовать спектр электромагнитного излучения, возникшего миллиарды лет назад.

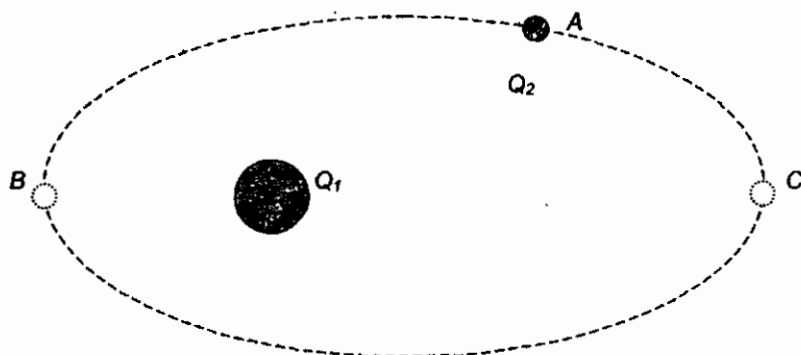
Итак, величина постоянной тонкой структуры  $\alpha$  равная:

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar} \approx \frac{1}{137} \quad (2.7)$$

не изменяется со временем и, значит, не зависит от величины гравитационного потенциала  $\Phi_{U_n}$ .

Существуют также основания считать, что и величина заряда электрона (элементарного электрического заряда) не зависит от величины гравитационного потенциала  $\Phi_{U_n}$ .

Во-первых, если бы величина заряда электрона зависела бы от величины гравитационного потенциала, то отсюда следовало бы, что электрический заряд замкнутой системы может самопроизвольно менять свой знак (смотри рис. 3). Очевидно, что при этом возникнут проблемы с законом сохранения энергии.



**Рис. 3.** Вокруг планеты, по сильно вытянутой орбите движется спутник. Пусть планета имеет некоторый электрический заряд  $Q_1$ , а спутник заряд  $Q_2$ . Предположим, что когда спутник находится в т. А, то полный заряд всей системы равен нулю:  $Q_1 + Q_2 = 0$ . Если бы величина заряда электрона зависела от величины гравитационного потенциала, то при движении спутника по орбите величина заряда  $Q_2$  изменялась бы, и, следовательно, полный заряд всей системы был бы уже не равен нулю. Например, спутник находится в т. В (перигелий) и полный заряд всей системы меньше нуля:  $Q_1 + Q_2 < 0$ . В этом случае, когда спутник окажется в т. С (афелий), полный заряд всей системы будет, соответственно, больше нуля  $Q_1 + Q_2 > 0$ . Таким образом, электрический заряд замкнутой системы мог бы самопроизвольно менять свой знак.

Во-вторых, из электродинамических уравнений Максвелла также следует, что величина электрического заряда замкнутой системы должна оставаться неизменной.

Поэтому мы предполагаем, что величина заряда электрона *не зависит* от величины гравитационного потенциала.

Учитывая всё вышесказанное (то есть то, что ни постоянная тонкой структуры, ни заряд электрона не зависят от величины гравитационного потенциала), *мы вынуждены*, исходя из Нового закона (2.1) сделать следующий вывод.

*Величина постоянной Планка  $\hbar$  должна зависеть от величины гравитационного потенциала Вселенной  $\Phi_{Un}$ .*

Здесь необходимо сделать следующее замечание.

Мы постулировали уравнение (2.1) в качестве Нового закона природы. И поэтому мы просто обязаны исследовать все следствия, которые вытекают из него. Мы не должны бояться тех следствий, которые, на первый взгляд, могут показаться маловероятными или даже неправдоподобными. И если Новый закон не верен, то рано или поздно мы обязательно придём к противоречию. И наоборот, если, исследуя разные области физики с помощью Нового закона, мы не придём к противоречию, более того, сможем с новой точки зрения разрешить многие существующие проблемы, то это будет с большой вероятностью означать, что постулированный нами Новый закон является истинным законом природы.

## § 2.10. Постоянная Планка в гравитационном поле

В предыдущем параграфе мы пришли к выводу, что величина постоянной Планка  $\hbar$  должна зависеть от величины гравитационного потенциала Вселенной  $\Phi_{Un}$ .

Рассчитаем конкретный вид этой зависимости.

Так как  $\alpha = e^2/c\hbar$ , и учитывая, что ни величина заряда электрона  $e$ , ни величина постоянной тонкой структуры  $\alpha$  не зависят от величины гравитационного потенциала, мы получаем:

$$c\hbar = e^2/\alpha = const \quad (2.8)$$

То есть величина произведения  $c\hbar$  не зависит от величины гравитационного потенциала Вселенной  $\Phi_{Un}$ . Подставляя скорость света  $c$  из уравнения (2.1) в уравнение (2.8), получаем:

$$\hbar = \frac{e^2}{\alpha \sqrt{-\Phi_{Un}}} \quad (2.9)$$

Итак, мы получили, что чем больше абсолютная величина гравитационного потенциала Вселенной  $\Phi_{Un}$  (чем больше глубина вселенского гравитационного океана), тем меньше значение постоянной Планка  $\hbar$ .

Но ведь величина постоянной Планка характеризует неопределённость в движении частиц. Чем больше величина постоянной Планка, тем больше неопределённость в движении частиц (1.24). Таким образом, неопределённость в движении частиц увеличивается при уменьшении модуля гравитационного потенциала Вселенной.

Уравнение (2.9) имеет простой физический смысл. Для того чтобы электрон имел определённое положение, его нужно локализовать в окрестности некоторой точки. И чем меньше окрестность, в которой локализован электрон, тем больше энергия электромагнитного поля, создаваемого им (а в пределе электромагнитная энергия точечного заряда стремится к бесконечности [5;с.126]). И, значит, для большей определённости местоположения необходима большая энергия. Таким образом, неопределённость в движении электрона определяется, с одной стороны, величиной его заряда ( $e$ ), а, с другой стороны, энергией его взаимодействия со всей остальной материей во Вселенной ( $\Phi_{Un}$ ).

Получается, что огромные массы Вселенной своим воздействием (которое характеризуется огромной величиной их суммарного гравитационного потенциала  $\Phi_{Un}$ ) уменьшают неопределённость, а, значит, и хаотичность в движении частиц. Чем больше глубина гравитационного океана, тем меньше неопределённость в движении частиц.

В том случае, если изменение гравитационного потенциала  $\Delta\Phi$  мало по сравнению с величиной  $\Phi_{Un}$ , то есть  $|\Delta\Phi| \ll |\Phi_{Un}|$ , то



из уравнения (2.8) следует:  $\Delta h/h = -\Delta c/c$ . И, учитывая (2.4), получаем:

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta \Phi}{2c^2} \quad (2.10)$$

Допустим, мы поднялись над земной поверхностью на высоту  $h = 200$  м. Как сильно возрастет при этом величина постоянной Планка? Используя уравнение (2.10), это нетрудно рассчитать. Учитывая что  $\Delta \Phi = gh$  (где  $g \approx 10 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения), получаем:

$$\Delta h/h = gh/2c^2 \quad (2.11)$$

В § 3.5 мы несколько уточним уравнение для изменения величины гравитационного потенциала  $\Delta \Phi$ .

Подставляя в уравнение (2.11) соответствующие значения величин, в результате получаем:

$$\Delta h/h \approx 10^{-14} \quad (2.12)$$

Итак, предполагая, что величина скорости света определяется суммарным гравитационным потенциалом Вселенной (2.1), мы пришли к выводу, что и величина постоянной Планка также зависит от гравитационного потенциала (2.9).

Однако, как следует из уравнений (2.4) и (2.10), значения скорости света и постоянной Планка изменяются в земных условиях очень незначительно, что и позволяет (в пределах точности современного эксперимента) считать их фундаментальными постоянными.

В следующей главе мы продолжим рассмотрение следствий, вытекающих из постулированного нами Нового закона природы.

## Глава 3

# ОСНОВЫ НОВОЙ ТЕОРИИ

В этой главе мы рассмотрим основные положения, которые лежат в фундаменте новой теории, а также наиболее важные следствия, вытекающие из них.

### § 3.1. Новая модель пространства-времени

Итак, в качестве **Нового закона** природы мы приняли следующее утверждение:

Скорость распространения гравитационного поля  $V_{grav}$  определяется величиной гравитационного потенциала  $\Phi_{Un}$ , созданного всеми массами, существующими во Вселенной (2.1):

$$V_{grav} = c = \sqrt{|\Phi_{Un}|}$$

Учитывая, что ни заряд электрона  $e$ , ни постоянная тонкой структуры  $\alpha$  не зависят от величины гравитационного потенциала (см. § 2.8), мы пришли к следующему выводу.

Величина постоянной Планка  $\hbar$  также зависит от величины гравитационного потенциала Вселенной  $\Phi_{Un}$  (2.9):

$$\hbar \sqrt{|\Phi_{Un}|} = const = e^2/\alpha$$

Таким образом, суть новой модели пространства-времени состоит в следующем:

*Величины скорости света  $c(\mathbf{r}, t)$  и постоянной Планка  $\hbar(\mathbf{r}, t)$  в данной точке пространства  $\mathbf{r}$  и в данный момент времени  $t$  зависят от величины гравитационного потенциала Вселенной  $\Phi_{Un}(\mathbf{r}, t)$  в этой точке пространства следующим образом:*

$$c^2(r,t) + \Phi_{Un}(r,t) = 0$$

$$\hbar^2(r,t) \cdot \Phi_{Un}(r,t) = -\frac{e^4}{\alpha^2} = const$$

Законы, определяющие движение тел, зависят и от величины постоянной Планка, и от величины скорости света. Поэтому основной вывод новой теории состоит в том, что законы движения тел определяются величиной гравитационного потенциала Вселенной  $\Phi_{Un}$  (зависят от глубины космического гравитационного океана). А это, в свою очередь, означает, что движение тела определяется энергией его гравитационного взаимодействия со всеми остальными телами, существующими во Вселенной.

Из уравнений (2.1) и (2.9) следует, что со временем (так как наша Вселенная расширяется) величина скорости света будет уменьшаться, а величина постоянной Планка увеличиваться. На основании этого в 10-й главе будет предложена новая модель эволюции Вселенной, которая позволит разрешить многие проблемы современной астрофизики.

Также из этих уравнений следует, что на достаточном удалении от всех масс Вселенной (где величина гравитационного потенциала  $\Phi_{Un}$  стремится к нулю) величина скорости света  $c$  уменьшается до нуля, а величина постоянной Планка  $\hbar$  неограниченно возрастает.

Это означает, что по мере удаления от всех масс Вселенной возрастает неопределённость в движении тел и неопределённость в движении элементарных частиц, из которых состоят все тела. Вследствие этого на достаточном удалении от всех масс Вселенной макроскопические тела распадутся на элементарные частицы. А неопределённость в движении элементарных частиц будет столь высока, что частицы не будут иметь даже приближённой траектории движения. Очевидно, что понятие системы отсчёта в таких условиях теряет физический смысл. Поэтому понятия времени и расстояния также теряют физический смысл.

А внутри нашей Вселенной благодаря сильному гравитационному воздействию звёзд и галактик (это воздействие

проявляется в огромной величине гравитационного потенциала Вселенной ( $|\Phi_{Un}| \approx 10^{17} \text{ м}^2/\text{с}^2$ ) неопределённость в движении элементарных частиц значительно уменьшается. И внутри Вселенной свободная элементарная частица движется «почти» по прямой линии и «почти» с постоянной скоростью.

Получается, что свободная частица движется по инерции только благодаря совместным усилиям всех звёзд. Так как каждая звезда вносит свой небольшой вклад в значение гравитационного потенциала Вселенной  $\Phi_{Un}$ , и, следовательно, несколько уменьшает значение постоянной Планка. Таким образом, новая модель пространства-времени удовлетворяет принципу Маха.

Итак, суть новой теории состоит в том, что гравитационное воздействие звёзд и галактик существенно уменьшает неопределённость в движении частиц, и вследствие этого эффект неопределённости наблюдается только в микромире.

## § 3.2. Инерция и гравитация

Из эксперимента известно, что инертная и гравитационная массы тела равны с высокой степенью точности. В § 1.9 мы уже говорили об этом. Экспериментальный факт равенства инертной и гравитационной масс лежит в основе общей теории относительности. Но теоретического обоснования это равенство не имеет.

Иначе говоря, не известно, *почему* инертная масса тела в точности равна его гравитационной массе.

С физической точки зрения инертная и гравитационная массы характеризуют совершенно разные свойства тела.

Величина гравитационной массы показывает, *как сильно* участвует данное тело в гравитационных взаимодействиях. Можно сказать, что эта масса является “гравитационным зарядом” тела [18, т.1; с.524].

А величина инертной массы показывает, *как сильно* данное тело будет оказывать сопротивление ускорению.

С физической точки зрения между инертной массой и гравитационной массой общего не больше, чем, например, между

инертной массой и электрическим зарядом. Тем не менее, везде и всегда инертная масса тела равна его гравитационной массе. Почему?

Давайте рассмотрим это равенство с точки зрения новой теории.

Из Нового закона (2.1) следует, что при приближении к границе Вселенной (под границей Вселенной мы будем подразумевать область, где воздействием звёзд можно пренебречь, то есть где  $\Phi_{Un} \rightarrow 0$ ) скорость света будет уменьшаться вплоть до нуля. Это означает следующее.

Во-первых, из формулы Эйнштейна (1.22) следует, что полная энергия любого физического объекта (твёрдого тела, элементарной частицы, электромагнитного излучения...) на границе Вселенной будет равна нулю, так как там равна нулю величина скорости света. То есть ни один физический объект не сможет существовать за пределами гравитационного поля Вселенной. И, следовательно, не сможет вылететь за пределы Вселенной.

Во-вторых, свет также не сможет вылететь за пределы Вселенной, так как он остановится у самой её границы.

В общем случае произвольный физический объект обладает некоторой инертной массой  $m_{in}$ . И, следовательно, по формуле Эйнштейна он обладает полной энергией  $E$ , равной:

$$E = m_{in} c^2 \quad (3.1)$$

С другой стороны, этот объект имеет некоторую гравитационную массу  $m_{gr}$ . И так как он взаимодействует со всеми массами Вселенной, то, следовательно, он обладает потенциальной энергией  $U$ , равной:

$$U = m_{gr} \Phi_{Un} \quad (3.2)$$

Так как  $\Phi_{Un} < 0$ , то потенциальная энергия  $U$  отрицательна:

$$U < 0$$

Спрашивается, какая величина больше,  $E$  или  $|U|$ ?

Очевидно, что величина  $E$  не может быть больше, чем величина  $|U|$ , так как ни одному физическому объекту не хватит энергии на то, чтобы вылететь за пределы гравитационного поля Вселенной.

Но с другой стороны, если данный объект превратить в пучок фотонов (например, произойдёт аннигиляция данного объекта при его взаимодействии с антивеществом), то полной энергии объекта как раз хватит на то, чтобы этому пучку фотонов долететь до границы Вселенной.

Таким образом, мы приходим к выводу, что *полная энергия любого объекта в точности равна его потенциальной энергии в гравитационном поле Вселенной.*

Давайте теперь запишем наши рассуждения на языке математики. При движении любого физического объекта в гравитационном поле сохраняется сумма его полной энергии и его потенциальной энергии, то есть:

$$E + U = const \quad (3.3)$$

Если  $\Phi_{Un} \rightarrow 0$ , то  $U \rightarrow 0$ . И, как следует из Нового закона (2.1),  $E = m_{in} c^2 \rightarrow 0$ . Таким образом, оказывается, что константа в уравнении (3.3) равна нулю:  $const = 0$ . И мы получаем, что для любого объекта всегда выполняется равенство:

$$E + U = 0 \quad (3.4)$$

С учётом (3.1) и (3.2) из уравнения (3.4) получаем:

$$m_{in} c^2 + m_{gr} \Phi_{Un} = 0 \quad (3.5)$$

А учитывая Новый закон (2.1):  $c^2 = -\Phi_{Un}$ , получаем:

$$m_{in} = m_{gr}$$

*Таким образом, из Нового закона (2.1) вытекает равенство инертной и гравитационной масс.*

### § 3.3. Формула Эйнштейна

В предыдущем параграфе мы получили уравнение (3.4), применимое для любого физического объекта:

$$E + U = 0$$

здесь  $E$  – полная энергия объекта, а  $U$  – его потенциальная энергия в гравитационном поле Вселенной.

Физический смысл этого уравнения следующий. *Любое тело обладает энергией только потому, что находится в гравитационном взаимодействии с другими телами Вселенной.*

А вне этого взаимодействия само по себе тело не может обладать энергией. Так как если  $\Phi_{Un} \rightarrow 0$ , то  $U = m_{gr}\Phi_{Un} \rightarrow 0$  и  $E = m_{in}c^2 \rightarrow 0$ .

Полная энергия тела  $E$  как раз равна его потенциальной энергии в гравитационном поле Вселенной:

$$E = |U|$$

В § 1.8, используя формулу Эйнштейна, мы вычислили, что энергия покоя тела массой 1 кг примерно равна  $10^{17}$  Дж. Там же мы задали вопрос, на который в рамках теории относительности ответа нет: почему масса обладает такой колоссальной энергией?

Сейчас мы можем дать ответ на этот вопрос. Масса обладает такой колоссальной энергией потому, что находится в гравитационном взаимодействии со всеми остальными телами, существующими во Вселенной. И это взаимодействие характеризуется огромной величиной гравитационного потенциала Вселенной:  $\Phi_{Un} = -c^2 \approx -10^{17} \text{ м}^2/\text{с}^2$

Полная энергия, которой обладает любая масса  $m$ , в точности равна её потенциальной энергии в гравитационном поле Вселенной:  $mc^2 = -m\Phi_{Un}$ .

### § 3.4. Масса в гравитационном поле

При движении тела (или частицы) в гравитационном поле над ним совершается работа  $dA$ , равная:  $dA = -m_{gr}d\Phi$ . Здесь  $d\Phi$  – бесконечно малое изменение гравитационного потенциала Вселенной  $\Phi$  (в дальнейшем мы будем обозначать гравитационный потенциал Вселенной заглавной буквой  $\Phi$  без индекса внизу), а  $m_{gr}$  – гравитационная масса тела. Она всегда равна инертной массе тела  $m_{in}$  и поэтому зависит от скорости тела  $V$  и его массы покоя  $m_0$  следующим образом:

$$m_{gr} = m_{in} = \gamma m_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (3.6)$$

Изменение полной энергии тела  $dE$ , в соответствии с законом сохранения энергии, будет равно:  $dE = dA \Rightarrow$

$d(m_{in}c^2) = -m_g d\Phi$ . Учитывая уравнение (3.6), получаем:

$$d(\gamma m_0 c^2) = -\gamma m_0 d\Phi \Rightarrow \gamma m_0 dc^2 + c^2 d(\gamma m_0) = -\gamma m_0 d\Phi$$

Из Нового закона (2.1) следует:

$$\gamma m_0 dc^2 + \gamma m_0 d\Phi = \gamma m_0 d(c^2 + \Phi) = 0$$

В результате получаем:  $c^2 d(\gamma m_0) = 0$ , и, следовательно:

$$\gamma m_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} = const \quad (3.7)$$

Таким образом, исходя из Нового закона, мы получили, что при движении тела (частицы) в гравитационном поле его инертная (гравитационная) масса остаётся постоянной.

Но это означает, что при движении тела (частицы) в гравитационном поле его масса покоя  $m_0$  изменяется, так как в зависимости от скорости тела  $V$  изменяется величина  $\gamma$ .

При  $V \ll c$ ,  $\gamma \approx 1$ , и изменение  $m_0$  практически не заметно. Например, если тело, ускоряясь в поле тяжести, приобрело скорость  $V = 500$  м/с, то:

$$\gamma \approx 1 + 10^{-12}$$

И, следовательно, относительное изменение массы покоя  $\Delta m_0$  составит величину:

$$\Delta m_0 / m_0 \approx 10^{-12}$$

Из уравнения (3.7) следует, что при движении тела (частицы) его масса покоя зависит от величины гравитационного потенциала Вселенной следующим образом:

$$m_0(\Phi) = \chi(\Phi_0) m_0(\Phi_0) / \chi(\Phi) \quad (3.8)$$

Например, если элементарная частица ускоряется в гравитационном поле (движется в направлении уменьшения гравитационного потенциала:  $\Phi < \Phi_0$ , но  $|\Phi| > |\Phi_0|$ ), то:

$$\chi(\Phi) > \chi(\Phi_0)$$

И согласно уравнению (3.7) её масса покоя уменьшается.

Таким образом, масса покоя элементарной частицы зависит от величины гравитационного потенциала Вселенной, то есть зависит от распределения остальной материи во Вселенной. Конкретный вид этой зависимости мы получим в §3.6.



Известно, что при увеличении скорости тела его инерция (инертная масса) возрастает (3.6). Но для того чтобы увеличить скорость тела, ему нужно передать энергию. А так как любая энергия  $\Delta E$  обладает инерцией:

$$\Delta m = \Delta E/c^2$$

то вместе с энергией телу передаётся и инертная масса. Таким образом, инерция тела возрастает за счёт *передачи ему инертной массы* (вместе с энергией).

А когда тело разгоняется в гравитационном поле, его инертная (а значит и гравитационная) масса *не изменяется*. Так как в этом случае энергия тела возрастает не за счёт увеличения инертной массы, а за счёт увеличения скорости света:

$$\Delta E = m\Delta(c^2)$$

Этому можно дать следующий комментарий. Гравитационная масса тела (она равна инертной) является, в каком-то смысле, гравитационным зарядом тела [18, т.1; с.524] и поэтому при гравитационном взаимодействии не изменяется.

В случае движения фотона в гравитационном поле уравнение (3.7) неприменимо, так как фотон не имеет массы покоя. Поэтому, учитывая, что  $E = m_{in} c^2$ , уравнение (3.7) можно представить в виде:

$$\frac{E}{c^2} = const \quad (3.9)$$

Итак, при движении какого-либо объекта (твёрдого тела, пучка фотонов, элементарной частицы...) в гравитационном поле сохраняется инертная масса данного объекта, то есть отношение его полной энергии к квадрату скорости света.

### § 3.5. Чему равна потенциальная энергия?

Предположим, что тело массой  $m$  подняли на высоту  $h$  над земной поверхностью. Чему равно изменение его потенциальной энергии? Казалось бы, ответ очевиден. Изменение потенциальной энергии равно:

$$\Delta U = mgh$$

где  $g \approx 10 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения. Ведь если тело упадёт с высоты  $h$ , то оно совершит работу:

$$A = mgh$$

А совершённая работа как раз и равна изменению потенциальной энергии. И всё-таки это рассуждение неверно!

Не следует забывать, что любое тело обладает также и внутренней энергией – энергией покоя:

$$E_0 = m_0 c^2$$

Эта энергия огромна. Если тело массой  $1 \text{ кг}$  упадёт с высоты  $100 \text{ м}$ , то оно совершит работу в  $1000 \text{ дж}$ . А энергия покоя тела массой  $1 \text{ кг}$  равна  $10^{17} \text{ дж}$ , то есть на  $14$  порядков больше! Поэтому, если при падении тела его внутренняя энергия изменится хотя бы на очень незначительную в процентном отношении величину, то этим изменением пренебречь нельзя. Следовательно, мы должны записать закон сохранения энергии так:

$$E_0 + K + U = \text{const} \quad (3.10)$$

При движении тела в гравитационном поле будет сохраняться сумма его внутренней  $E_0$ , кинетической  $K$  и потенциальной  $U$  энергий.

Кроме того, при движении тела в гравитационном поле остаётся постоянной его релятивистская масса (3.7). А так как скорость тела  $V$  увеличивается, то, следовательно, масса покоя уменьшается. Поэтому каким-то образом изменяется и внутренняя энергия. И в общем случае:

$$|\Delta U| = \Delta K + \Delta E_0 \quad (3.11)$$

Известно, что:  $\Delta K = \frac{mV^2}{2} = mgh$ . А так как  $\Delta E_0 \neq 0$ , то:

$$|\Delta U| \neq mgh.$$

Чему же тогда равно изменение потенциальной энергии? Для ответа на этот вопрос напомним следующее.

Во-первых, физические процессы, происходящие внутри падающего тела, не могут ни ускорить, ни замедлить его падения. Это есть следствие равенства инертной и гравитационной масс.

Во-вторых, тело будет падать с ускорением свободного падения  $g$ , по крайней мере в том случае, когда его скорость  $V$  много меньше скорости света.

Рассмотрим куб с зеркальными внутренними стенками, который свободно падает в поле тяжести с ускорением  $g$  (смотри рис. 4). В момент времени  $t_0$  (момент начала падения куба) из точки  $A$  перпендикулярно полю тяжести вылетает фотон со скоростью  $c_0$ . Из-за силы тяжести фотон летит к противоположной стенке куба (точка  $B$ ) по слегка искривлённой траектории. При движении фотона в поле тяжести его скорость изменяется согласно Новому закону (2.1):

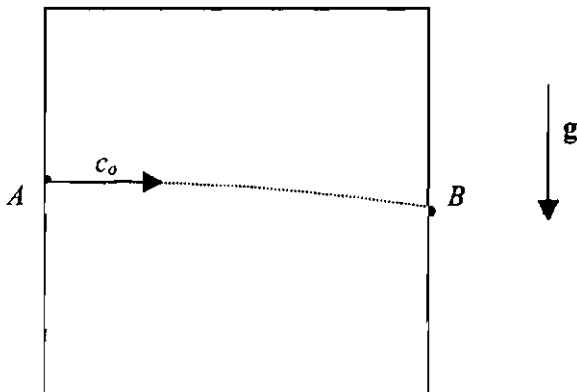
С другой стороны, масса фотона (под массой фотона мы подразумеваем массу  $\mu = \varepsilon/c^2$ , где  $\varepsilon$  – энергия фотона) не изменяется (3.9). Не изменяется также и горизонтальная составляющая импульса фотона  $p_x = \mu c_x$ . Следовательно, не изменяется и горизонтальная составляющая его скорости  $c_x$ :

$$c_x = \text{const} = c_0$$

Поэтому скорость фотона изменяется только за счёт вертикальной составляющей его скорости  $c_y$ .

$$c^2 = -\Phi = -\Phi_0 - \Delta\Phi = c_0^2 + |\Delta\Phi| \quad (3.12)$$

Рис. 4



Так как:  $c^2 = c_x^2 + c_y^2 = c_0^2 + c_y^2$ , то, с учётом уравнения (3.12), получаем:

$$c_y^2 = |\Delta\Phi| \quad (3.13)$$

Если вертикальная составляющая скорости фотона  $c_y$  будет увеличиваться быстрее, чем скорость падения куба, то фотон будет “падать” быстрее, чем куб. В результате этого он со временем догонит нижнюю стенку куба, ударится об неё и тем самым ускорит падение куба. А это невозможно. Если же  $c_y$  будет возрастать медленнее, чем скорость падения куба, то куб будет падать вниз быстрее, чем фотон. В результате этого произойдёт соударение верхней стенки куба и фотона. При этом куб передаст фотону часть своего импульса и несколько замедлит своё падение. А это также невозможно.

Таким образом, мы приходим к выводу, что скорость “падения” фотона  $c_y$  равна скорости падения куба  $V$ :  $c_y = V$ . А так как известно, что  $V^2 = 2gh$ , то  $c_y^2 = 2gh$ .

С другой стороны:  $c_y^2 = -\Delta\Phi$ . И в результате получаем:

$$-\Delta\Phi = 2gh \quad (3.14)$$

то есть:

$$|\Delta U| = m|\Delta\Phi| = 2mgh \quad (3.15)$$

Мы получили, что изменение потенциальной энергии тела равно  $2mgh$ ! А совсем не  $mgh$ , как принято считать. Изменение же кинетической энергии тела равно  $\Delta K = mgh$ , и поэтому, как видно из уравнения (3.11), изменение внутренней энергии тела также равно:

$$\Delta E_0 = mgh$$

Рассмотрим подробнее полученный результат. Тело массой  $m$  падает с высоты  $h$  в поле тяжести  $g$ . Изменение потенциальной энергии тела равно  $|\Delta U| = 2mgh$ . Это изменение потенциальной энергии переходит в кинетическую энергию тела и в его внутреннюю энергию (энергию покоя). При этом только половина потенциальной энергии переходит в кинетическую, а вторая половина – во внутреннюю энергию.

Внутренняя энергия тела – это энергия, находящаяся в скрытой форме. Её нельзя наблюдать непосредственно. Кинетическую же энергию тела можно использовать, например,

для совершения работы. Поэтому при падении тела учитывают только изменение его кинетической энергии и делают отсюда неверный вывод об изменении потенциальной энергии. Изменение потенциальной энергии занижается ровно в два раза.

Таким образом, исходя из Нового закона (2.1), мы установили, что действительное изменение гравитационного потенциала  $\Delta\Phi$  ровно в два раза больше, чем это предполагается в теории тяготения Ньютона.

Это означает, что если  $\varphi_1$  – значение ньютоновского потенциала в одной точке пространства (здесь и далее мы будем обозначать ньютоновский потенциал буквой  $\varphi$ ), а  $\varphi_2$  – его значение в другой точке, то:

$$\Phi_2 - \Phi_1 = 2(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (3.16)$$

Например, изменение ньютоновского потенциала  $\Delta\varphi$ , создаваемого точечной массой  $M$  на расстоянии  $r$ , равно (1.5):

$$\Delta\varphi = -G \frac{M}{r}$$

И, значит, действительное изменение гравитационного потенциала  $\Delta\Phi$ , создаваемого той же массой, равно:

$$\Delta\Phi = -2G \frac{M}{r} \quad (3.17)$$

До тех пор пока скорость тела мала по сравнению со скоростью света, использование ньютоновского потенциала не приводит к ошибке, так как всегда только половина потенциальной энергии переходит в кинетическую:

$$\Delta K = -m\Delta\Phi/2 = -m\Delta\varphi$$

Однако, при вычислении траектории для релятивистской частицы теория тяготения Ньютона приведёт уже к неверному результату. Например, фотон не имеет энергии покоя. Поэтому при движении в поле тяжести вся потенциальная энергия фотона переходит в кинетическую. Подробнее мы поговорим об этом в § 4.6.

А сейчас необходимо отметить следующее. В § 2.8 для вычисления изменения скорости света мы воспользовались выражением для гравитационного потенциала (1.5). Но теперь,

учитывая Новый закон (2.1), мы пришли к выводу, что изменение гравитационного потенциала ровно в два раза больше. Следовательно, максимальное изменение величины скорости света в течение года (2.6) будет также в два раза больше и составит величине  $|\Delta c| = 0,1 \text{ м/с}$ .

### § 3.6. Масса элементарной частицы

В параграфе § 3.4 мы сделали вывод о том, что при движении элементарной частицы в гравитационном поле её масса покоя изменяется в зависимости от величины гравитационного потенциала (3.8). Давайте рассчитаем конкретный вид этой зависимости.

Предположим, что в момент времени  $t_0$  частица с массой покоя  $m_0$  оказывается в гравитационном поле с потенциалом  $\Phi$ . Под действием поля она начинает двигаться с ускорением. При этом, как уже отмечалось ранее, инертная масса частицы остаётся постоянной. А её скорость (а значит и значение  $\gamma$ ) изменяется. И поэтому масса покоя  $m_0$  следующим образом зависит от времени:

$$m_0(t) = m_0(t_0)\gamma(t_0)/\gamma(t) \quad (3.18)$$

Если скорость частицы увеличивается, то  $\gamma(t) > \gamma(t_0)$ . Отсюда следует, что:  $m_0(t) < m_0(t_0)$ . Предположим, скорость частицы  $V$  мала по сравнению со скоростью света ( $V \ll c$ ). Как было установлено в предыдущем параграфе, увеличение кинетической энергии  $dK$  равно половине изменения потенциальной энергии  $dU$ , взятой с обратным знаком:

$$dK = -dU/2 = -md\Phi/2 \quad (3.19)$$

Пусть частица начинает двигаться под действием силы тяжести, и  $dK$  – это вся её кинетическая энергия. Если мы заберём у частицы кинетическую энергию  $dK$ , то вместе с энергией мы заберём и инертную массу  $dm = dK/c^2$ . Следовательно, изменение массы покоя частицы будет равно:

$$dm_0 = -\frac{dK}{c^2} = -\frac{m_0 d\Phi}{2c^2} = -\frac{m_0 d(c^2)}{2c^2}$$

Отсюда следует:  $dm_0/m_0 = -d(c^2)/2c^2$ . Взяв интеграл от этого выражения (напомним, что  $\int dx/x = \ln(x) + const$ ), получим:

$$\int \frac{dm_0}{m_0} = -\int \frac{d(c^2)}{2c^2} \Rightarrow \ln m_0 = -\frac{1}{2} \ln c^2 + \text{const} \Rightarrow \ln (m_0 c) = \text{const} \Rightarrow$$

$$m_0 c = \text{const} \quad (3.20)$$

Или:

$$m_0 \sqrt{-\Phi} = \text{const} \quad (3.21)$$

Мы получили зависимость массы покоя частицы от величины гравитационного потенциала.

Из уравнения (3.21) следует, что в очень далёком прошлом, когда гравитационный потенциал Вселенной был в 100 раз больше, массы покоя элементарных частиц были в 10 раз меньше!

С точки зрения современной физики ничего не известно о том, зависят или нет массы элементарных частиц от распределения остальной материи во Вселенной. На эту тему в §1.6 была приведена цитата из Берклеевского курса физики. Поэтому по умолчанию предполагается, что массы покоя элементарных частиц – абсолютно неизменные величины.

В том, что массы покоя элементарных частиц могут зависеть от величины гравитационного потенциала, нет ничего противоестественного. Скорее наоборот, если бы массы покоя элементарных частиц не зависели от величины гравитационного потенциала, то именно тогда возникли бы некоторые затруднения. Рассмотрим в качестве примера разреженное облако элементарных частиц. Под действием взаимного гравитационного притяжения такое облако начнёт постепенно сжиматься. При этом скорости частиц будут возрастать. Если массы покоя частиц останутся неизменными, то их инертные массы возрастут из-за увеличения скоростей частиц. Это означает, что возрастет и инерция всего облака. Если облако движется как целое со скоростью  $V$ , то из-за увеличения инертной массы облака возрастет и его импульс. А это невозможно.

Можно, конечно, предположить, что гравитационное поле сжатого облака обладает отрицательной потенциальной энергией, а, значит, и отрицательной массой. Эта отрицательная масса как раз и компенсирует прирост инертной массы у частиц. Но на наш

взгляд, предположение о наличии отрицательной массы у чего бы то ни было не имеет достаточного основания.

Мы же, исходя из Нового закона (2.1), получили, что при движении в гравитационном поле сохраняется инертная масса тела. И *только поэтому* пришли к выводу, что масса покоя должна зависеть от величины гравитационного потенциала.

В 10-й главе мы покажем, как уравнение (3.21) позволит нам разрешить некоторые космологические проблемы.

### § 3.7. Современная физика и принцип Маха

Давайте ещё раз вкратце рассмотрим фундаментальные принципы, которые лежат в основе современной физики.

1. Основой механики Ньютона является закон инерции, который гласит: *скорость свободно двигающегося тела остаётся постоянной*. Этот закон получен на основе опыта, он не имеет теоретического объяснения [11;с.14].

2. Основой специальной теории относительности является принцип постоянства скорости света. *Смысл его в том, что величина скорости света не зависит от движения наблюдателя*. Это на первый взгляд парадоксальное утверждение объясняется тем, что масштаб времени и расстояния в движущейся системе отсчёта изменяется всегда таким образом, чтобы скорость света в ней оставалась одной и той же – 300 000 км/с.

3. Основой общей теории относительности является принцип эквивалентности, который гласит: *гравитационное поле локально неотличимо от неинерциальной системы отсчёта*. В основе этого принципа лежит экспериментальный факт равенства инертной и гравитационной масс. Но вопрос, почему инертная масса тела всегда равна гравитационной массе, в рамках современной физики остаётся без ответа.

4. Основу квантовой механики составляет принцип неопределённости. *Смысл его в том, что квантовый объект (например, электрон) при движении не имеет определённой траектории* [6;с.15]. Неопределённость движения электрона (как и любого другого квантового объекта) характеризуется



величиной постоянной Планка. С точки зрения современной физики остаётся загадкой, почему законы микромира носят вероятностный характер.

Перечисленные выше принципы независимы друг от друга, между ними отсутствует единство и взаимосвязь, хотя они отражают свойства одного и того же Мира. Какая, например, существует связь между законом инерции и принципом неопределённости? Или между постоянством скорости света и равенством инертной и гравитационной масс? С точки зрения современной физики это неясно.

Для того чтобы как-то объяснить закон инерции, мы рассмотрели гипотезу о том, что инерциальные системы отсчёта, существующие в окружающем нас пространстве, могут быть каким-то образом *связаны причинно со всеми* массами, заполняющими Вселенную. Эта гипотеза известна как принцип Маха. Как правило, ему придают следующий смысл: *при удалении от больших масс инерция пробного тела будет уменьшаться* [1;с.605]. Однако в этом направлении до сих пор не удалось получить каких-либо результатов [15;с.293].

Мы же сформулировали принципиально новую точку зрения на принцип Маха: *при удалении от больших масс неопределённость в движении пробного тела будет возрастать*. С этой точки зрения за пределами гравитационного поля Вселенной неопределённость в движении тел настолько высока, что теряет физический смысл понятие системы отсчёта. Соответственно, теряет физический смысл и различие между инерциальной и неинерциальной системами отсчёта. Таким образом (в соответствии с принципом Маха), различие между инерциальными и неинерциальными системами отсчёта возникает только благодаря гравитационному воздействию масс, заполняющих Вселенную.

Так как за пределами гравитационного поля Вселенной (там, где  $\Phi_{U_n} \rightarrow 0$ ) понятие системы отсчёта теряет физический смысл, то, следовательно, также теряют физический смысл понятия времени и расстояния. То есть с новой точки зрения наша Вселенная окружена Хаосом. И таким образом, не только

инерциальные системы отсчёта, но и само пространство-время обязано своим существованием большим массам, заполняющим Вселенную.

Как уже отмечалось в § 1.2, движение материальных тел в окружающем мире происходит в гравитационном поле, созданном огромной массой Вселенной. Суммарный гравитационный потенциал, создаваемый всеми массами Вселенной в околоземном пространстве, также огромен:  $\Phi_{Ун} \approx -10^{17} \text{ м}^2/\text{с}^2$ . В связи с этим в § 1.3 было выдвинуто предположение, что *движение физических объектов (описываемое классической механикой, теорией относительности и квантовой механикой) есть результат гравитационного взаимодействия данных объектов со всеми массами, существующими во Вселенной.* А во 2-й главе мы пришли к выводу, что фундаментальные характеристики пространства-времени (скорость света и постоянная Планка, которые входят во все законы движения) должны зависеть от распределения всех масс во Вселенной – уравнения (2.1) и (2.9).

Итак, вложив несколько иной физический смысл в принцип Маха, мы получили возможность, во-первых, дать новую интерпретацию квантовой механике – *неопределённость, наблюдаемая в микромире, есть остаток от хаотичности движения элементарных частиц после наложения ограничивающего воздействия огромной массы Вселенной.* Подробно эта тема будет рассмотрена в 6-й главе. Во-вторых, мы смогли обосновать принцип постоянства скорости света, который лежит в основе специальной теории относительности (§ 2.6). И, наконец, в-третьих, – теоретически обосновали равенство инертной и гравитационной масс, которое лежит в основе общей теории относительности (§ 3.2).

Таким образом, в рамках новой теории объединяются все основные принципы, лежащие в основании современной физики.

Однако наиболее существенное в данном случае – это то, что новую теорию можно проверить экспериментально, причём в земных условиях. Принципиально новый результат, вытекающий из неё, состоит в том, что *при увеличении высоты над земной*

поверхностью величина скорости света уменьшается (2.1), а значение постоянной Планка, наоборот, возрастает (2.9).

Таким образом, предоставляется возможность (впервые!) проверить принцип Маха экспериментально.

### § 3.8. Резюме

Повторим вкратце основные положения и следствия новой теории.

1. В качестве фундамента для построения новой теории мы использовали современные астрофизические данные о величине средней плотности и возрасте Вселенной. На основании этих данных можно сделать вывод, что квадрат скорости света равен (в пределах погрешности наблюдений) гравитационному потенциалу создаваемому всеми массами, существующими во Вселенной.

Поэтому мы предположили, что величина скорости света определяется гравитационным потенциалом Вселенной (2.1):

$$c^2 = -\Phi_{Un}$$

Это уравнение имеет простой физический смысл. Полная энергия любого тела массы  $m$  определяется его энергией гравитационного взаимодействия со всеми остальными телами Вселенной:

$$mc^2 = -m\Phi_{Un}$$

Уравнение (2.1), с одной стороны, объясняет, почему скорость света не зависит от движения наблюдателя (потому что величина гравитационного потенциала не зависит от движения наблюдателя). А с другой стороны, из него следует равенство инертной и гравитационной масс (так как  $m_{in} c^2 = -m_{gr} \Phi_{Un}$  и  $c^2 = -\Phi_{Un}$ , то  $m_{in} = m_{gr}$ ).

2. Учитывая неизменность постоянной тонкой структуры, мы сделали вывод, что величина постоянной Планка также зависит от величины гравитационного потенциала (2.9):

$$\hbar = \frac{e^2}{\alpha \sqrt{-\Phi_{Un}}}$$

Исходя из этого, мы пришли к выводу, что наша Вселенная окружена Хаосом. При приближении к Хаосу скорость света будет стремиться к нулю, а постоянная Планка неограниченно возрастать. Вследствие чего в Хаосе теряет физический смысл понятие системы отсчёта, а, значит, также теряют физический смысл понятия времени и расстояния.

Такая модель пространства-времени удовлетворяет принципу Маха и даёт возможность проверить его экспериментально. Для этого нужно измерять величину скорости света и постоянной Планка с высокой степенью точности. И если будет обнаружена слабая вариация этих фундаментальных постоянных в соответствии с уравнениями (2.1) и (2.9), то это будет *экспериментальным подтверждением* принципа Маха и *доказательством существования Хаоса* за пределами гравитационного поля Вселенной.

Таким образом, не вылетая за пределы Вселенной (что в принципе невозможно), мы всё-таки сможем узнать, что там находится!

3. При движении тела в гравитационном поле изменяется не только его кинетическая энергия, но также и внутренняя. Поэтому потенциальная энергия тела  $U$ , поднятого на высоту  $h$  над земной поверхностью, не равна  $mgh$ .

Как было выяснено в §3.5, она равна:

$$U = 2mgh.$$

При падении тела в поле тяжести (если его скорость мала,  $V \ll c$ ) только половина потенциальной энергии переходит в кинетическую:

$$\Delta K = \Delta U/2 = 2mgh/2 = mgh$$

А вторая половина переходит во внутреннюю энергию:

$$\Delta E_o = \Delta(m_o c^2) = \Delta U/2 = mgh$$

4. Из уравнения (2.1) также следует, что при движении частицы в гравитационном поле сохраняется её инертная (а значит и гравитационная) масса (3.7). Но это также означает, что масса покоя элементарной частицы изменяется при её движении в гравитационном поле, то есть масса покоя зависит от величины гравитационного потенциала (3.21).

*Чем “глубже” находится элементарная частица в гравитационном поле, тем меньше её масса покоя.*

Таким образом, суть новой теории состоит в следующем. *Величины скорости света, постоянной Планка, а также массы покоя элементарных частиц зависят от распределения всей остальной материи во Вселенной (от величины гравитационного потенциала).*

Новая теория позволяет ответить на *все* вопросы, которые были сформулированы в § 1.12 (на 8-й вопрос будет дан развёрнутый ответ в 7-й главе). Но наиболее существенным в новой теории является то, что её можно проверить экспериментально в земной лаборатории, причём уже в настоящее время. В § 8.3 и § 10.10 будут предложены простые эксперименты по проверке новой теории.

*Принципиально новый результат, вытекающий из неё, состоит в том, что скорость света зимой (когда Земля ближе всего подходит к Солнцу) на 0,1 м/с больше, чем летом.*

# Глава 4

## Новая интерпретация общей теории относительности

В общей теории относительности, которая в настоящее время является общепризнанной теорией гравитации, предполагается, что в гравитационном поле пространство-время *искривляется*. То есть пространственно-временной масштаб изменяется при переходе от одной точки поля к другой. Но что это означает? В чём состоит *физическое* отличие одной точки гравитационного поля от другой?

В рамках новой теории можно дать следующий ответ на этот вопрос. *В гравитационном поле скорость света и постоянная Планка изменяются при переходе от одной точки пространства к другой. И в первом приближении (то есть когда  $\Delta\hbar \ll \hbar$ ,  $\Delta c \ll c$ ) этот эффект можно рассматривать как искривление пространства-времени.*

### § 4.1. Основы общей теории относительности

Для физических процессов, происходящих в астрономических масштабах, существенную роль играет гравитационное взаимодействие. В настоящее время в качестве теории гравитации принята общая теория относительности. Рассмотрим основы этой теории.

Ещё Галилео Галилей первым экспериментально обнаружил тот факт, что все тела падают в поле тяжести Земли с одинаковым ускорением  $g$  (ускорением свободного падения). Затем Исаак Ньютон построил теорию гравитации, из которой также следовало (при условии, что инертная и гравитационная массы равны), что все тела в гравитационном поле будут двигаться с одинаковым ускорением. А с другой стороны, в системе отсчёта, которая движется с ускорением  $\mathbf{a} = -g$ , все тела будут двигаться с одинаковым ускорением  $g$ . Поэтому существует некоторая аналогия между движением тел в поле тяжести и их движением в неинерциальной системе отсчёта.

После создания специальной теории относительности стало ясно, что время и расстояние не абсолютны в том смысле, что они зависят от выбранной системы отсчёта. В неинерциальной же системе отсчёта масштаб времени и расстояния изменяется при переходе от одной точки пространства к другой. В качестве примера можно рассмотреть платформу, которая вращается с угловой скоростью  $\omega$  относительно точки  $O$ . В такой системе отсчёта часы будут идти тем медленнее, чем дальше они находятся от центра вращения:

$$\Delta t(r) = \Delta t_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{\omega^2 r^2}{c^2}}$$

Здесь  $\Delta t_0$  – интервал времени, прошедший по часам, находящимся в точке  $O$ , а  $\Delta t(r)$  – интервал времени, прошедший по часам, находящимся на расстоянии  $r$  от центра вращения. Масштаб длины также будет меняться в зависимости от расстояния до центра вращения [5;с.296].

Учитывая аналогию между гравитационным полем и неинерциальной системой отсчёта, Эйнштейн предположил, что гравитационное поле – это искривление пространства-времени: *в гравитационном поле пространственно-временной масштаб (метрика) изменяется при переходе от одной точки пространства к другой*. На основе этого предположения он получил уравнения, связывающие геометрию пространства-времени с распределением в пространстве движущейся материи.

В искривлённом (неевклидовом) пространстве не существует понятия прямой линии. Роль “прямой линии” в таком пространстве играет геодезическая линия – кратчайшее (экстремальное) расстояние между двумя точками. Например, на земной поверхности геодезическими линиями являются экватор и меридианы. Таким образом, массы искривляют четырёхмерное пространство-время и движутся в таком искривлённом пространстве-времени по геодезическим линиям [5;с.317]. В общем случае с точки зрения общей теории относительности эффект гравитации состоит в следующем. *Вблизи массивных тел изменяется пространственно-временной масштаб.* Например, замедляется течение времени [5;с.322]. *На достаточном же удалении от всех тел в пустом пространстве действуют законы специальной теории относительности* [5; с.388].

## § 4.2. Кривизна пространства-времени

Свободно движущееся тело движется по прямой линии, то есть по кратчайшему пути между двумя точками. Математически это утверждение можно записать так:

$$\ell_{AB} = \int_A^B dl = \min$$

То есть из точки  $A$  в точку  $B$  тело движется таким образом, чтобы пройденный путь  $\ell_{AB}$  имел минимальную длину. В четырёхмерном псевдоевклидовом пространстве-времени, в котором роль расстояния играет интервал  $s$ , такое тело также будет двигаться по прямой линии. Но из-за того, что в выражение для квадрата интервала (1.20) пространственные координаты входят со знаком минус, прямая в псевдоевклидовом пространстве-времени имеет не минимальную, а максимальную длину:

$$\int_A^B ds = \max \quad (4.1)$$

Основная идея общей теории относительности состоит в том, что и при наличии гравитационного поля тело будет



двигаться из точки  $A$  в точку  $B$  в соответствии с уравнением (4.1). И единственное отличие гравитационного поля от пустого пространства состоит в следующем. В различных точках пустого пространства один и тот же пространственно-временной масштаб. А в гравитационном поле пространственно-временной масштаб изменяется при переходе от одной точки к другой [5;с.317].

Чтобы лучше понять физический смысл искривлённого пространства, рассмотрим в качестве примера глобус, сделанный из тонкой резины. Допустим, мы вырезали из него Тихий океан, а затем растянули во все стороны вырезанный кусок и наклеили его на плоский стол (примерно так и делают географические карты). Теперь нам, к примеру, нужно начертить на получившейся карте кратчайший путь из Южно-Сахалинска до острова Пасхи. Из-за того, что в разных местах карты разный масштаб (по-разному растянута резина), прямая линия, проведённая на карте между двумя точками, уже не будет кратчайшим расстоянием между ними. Так, например, меридиан является кратчайшим расстоянием между точками на земной поверхности, а на географических картах меридианы, как правило, искривлены. Гравитационное поле можно образно сравнить с такой картой. В различных точках гравитационного поля пространство-время “растянуто” по-разному. Таким образом, с точки зрения общей теории относительности эффект гравитации целиком сводится к искривлению пространства-времени, которое состоит в том, что для квадрата интервала изменяется выражение (1.20).

Уравнения тяготения Эйнштейна – это тензорные уравнения, связывающие распределение материи (энергии) с кривизной пространства-времени [5;с.357]:

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ik} \quad (4.2)$$

Здесь  $T_{ik}$  – тензор энергии-импульса,  $g_{ik}$  – метрический тензор, он связывает величину квадрата интервала с пространственно-временными координатами,  $R_{ik}$  – тензор Риччи,  $R$  – скалярная кривизна пространства-времени. Величины  $R_{ik}$  и  $R$  непосредст-

венно связаны с величинами  $g_{ik}$ . Уравнения Эйнштейна, в принципе, позволяют определить величины  $g_{ik}$  и в результате рассчитать выражение для квадрата интервала. Но даже в простейшем случае гравитационного поля, создаваемого точечной массой, решение этих уравнений сопровождается громоздкими математическими выкладками, для понимания которых необходимо владеть тензорным анализом в рамках Римановой геометрии.

Как уже было отмечено в § 1.3, все гравитационные поля внутри нашей Вселенной являются слабыми (гравитационное поле считается слабым, если в нём  $|\Delta\phi| \ll c^2$ ). Поэтому уравнения Эйнштейна экспериментально проверены только в случае слабых гравитационных полей. Например, в гравитационном поле Солнца, где  $|\Delta\phi|/c^2 \leq 10^{-6}$ . Но в слабом гравитационном поле уравнения Эйнштейна приводят практически к тем же самым уравнениям движения, что и ньютоновский закон Всемирного тяготения. Тем не менее, всё-таки существует ряд дополнительных эффектов, вытекающих из общей теории относительности, которые были экспериментально подтверждены. Это так называемые релятивистские гравитационные эффекты. Их мы рассмотрим в следующем параграфе.

### § 4.3. Релятивистские гравитационные эффекты

Из уравнений (4.2) можно рассчитать, что квадрат интервала в слабом гравитационном поле, создаваемом точечной массой  $M$ , изменяется в зависимости от расстояния  $r$  до неё следующим образом [5;с.393]:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) c^2 dt^2 - \left(1 + \frac{2GM}{rc^2}\right) (dx^2 + dy^2 + dz^2) \quad (4.3)$$

Так как квадрат интервала в разных точках гравитационного поля имеет разное значение, то имеет смысл только выражение для квадрата бесконечно малого интервала  $ds$ . Это уравнение вместе с общим принципом (4.1) полностью определяет движение тела в гравитационном поле массы  $M$ .

Из уравнения (4.3) вытекают несколько эффектов, наблюдаемых в гравитационном поле Солнца и подтверждающих общую теорию относительности. Это так называемые классические релятивистские гравитационные эффекты: движение перигелия Меркурия, гравитационное смещение спектральных линий и отклонение световых лучей, проходящих вблизи Солнца. Во второй половине 20-го века к ним добавляется ещё один гравитационный эффект – эффект Шапиро [36;с.191].

**1. Движение перигелия Меркурия.** С точки зрения теории тяготения Ньютона движение планеты происходит по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце. Так как планета притягивается не только к Солнцу, но и к остальным телам Солнечной системы, то эллипс, по которому движется планета, медленно поворачивается в пространстве. Этот эффект очень незначительный: перигелий планеты смещается всего на несколько угловых минут в столетие.

С помощью теории тяготения Ньютона удалось рассчитать и объяснить смещение перигелия для всех планет Солнечной системы кроме Меркурия. Перигелий Меркурия смещается на 575 угловых секунд в столетие, из них возмущающий эффект от других планет составляет 532 угловых секунды, а оставшиеся 43 секунды не объяснимы с точки зрения теории тяготения Ньютона [16;с.98].

С точки же зрения общей теории относительности из-за искривления пространства-времени эллипс, по которому движется планета, должен медленно поворачиваться в пространстве. И для Меркурия этот эффект как раз и составляет 43 секунды в столетие.

Правда высказывались предположения, что смещение перигелия Меркурия может быть вызвано сплюснутостью Солнца [18,т.5;с.193]. Для остальных же планет Солнечной системы этот релятивистский эффект настолько мал, что его трудно обнаружить экспериментально.

**2. Гравитационное смещение спектральных линий.** Следующий эффект, который вытекает из общей теории относительности – это гравитационное смещение спектральных

линий. С точки зрения общей теории относительности «спектр, испускаемый какими-либо атомами, находящимися, например, на Солнце, выглядит там точно так же, как выглядит на Земле спектр, испускаемый находящимися на ней такими же атомами. Если же на Земле наблюдается спектр, испускаемый атомами, находящимися на Солнце, то его линии окажутся смещёнными по сравнению с линиями такого же спектра, испускаемого на Земле. Именно каждая линия с частотой  $\omega$  будет смещена на интервал  $\Delta\omega$ , определяемый из формулы:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{c^2} \quad (4.4)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – потенциалы гравитационного поля соответственно в месте испускания и в месте наблюдения спектра» [5;с.324].

Следует подчеркнуть, что  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – это ньютоновские гравитационные потенциалы, то есть  $2 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = \Phi_1 - \Phi_2$  (3.16).

Так как  $\varphi_1 - \varphi_2 < 0$ , то  $\Delta\omega < 0$ , то есть смещение происходит в сторону меньших частот. Это так называемое красное смещение.

С точки зрения общей теории относительности физический смысл этого явления следующий. При наличии гравитационного поля в разных точках пространства время течёт по-разному. В данном случае значение гравитационного потенциала на Солнце ниже, чем на Земле, и поэтому время на Солнце течёт медленнее, чем на Земле. Это означает, что с точки зрения земного наблюдателя все процессы, происходящие на Солнце (в том числе и электромагнитные колебания), происходят медленнее, чем на Земле. Поэтому и происходит смещение спектральных линий в инфракрасную сторону [5;с.324]. В настоящее время уравнение (4.4) проверено с точностью около 0,1 % [18,т.5;с.192].

**3. Отклонение световых лучей, проходящих вблизи Солнца.** С точки зрения общей теории относительности пространство-время вблизи Солнца искривлено. Поэтому искривляются и траектории световых лучей. Например, если луч света проходит на расстоянии  $r$  от центра Солнца, то он отклонится на угол  $\alpha$  [5;с.398]:

$$\alpha = \frac{4GM_S}{rc^2} \quad (4.5)$$

Если луч света проходит вблизи Солнца, то  $r$  – радиус Солнца, и получаем  $\alpha = 1,75$  угловых секунды. В рамках ньютоновской теории тяготения также можно рассчитать отклонение луча света, проходящего вблизи Солнца. Если рассматривать фотон как частицу, которая притягивается к Солнцу, то получим следующее значение для угла отклонения  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{2GM_S}{rc^2} \quad (4.6)$$

Выражение (4.6) для отклонения световых лучей было получено ещё в 1801 году [16;с.120]. Таким образом, для отклонения световых лучей, проходящих вблизи Солнца, общая теория относительности даёт ровно в два раза большее значение, чем ньютоновская теория тяготения. В 1919 году во время полного солнечного затмения было экспериментально подтверждено уравнение (4.5), и, тем самым, впервые сделана экспериментальная проверка общей теории относительности. В настоящее время уравнение (4.5) проверено с точностью около 0,1 % [18;т.5,с.193].

Следует отметить, что именно экспериментальная проверка уравнения (4.5) является основным подтверждением общей теории относительности.

Дело здесь в том, что гравитационное смещение спектральных линий может быть объяснимо и с точки зрения ньютоновской теории тяготения: фотоны теряют энергию на преодоление гравитационного притяжения. Но уравнение (4.5) даёт в два раза большее значение, чем уравнение (4.6), и этот эффект совершенно несобыясним в рамках теории тяготения Ньютона.

**4. Эффект Шапиро.** С точки зрения общей теории относительности время вблизи большой массы замедляется. Поэтому свет движется в гравитационном поле медленнее, чем в пустом пространстве. Для луча, проходящего вблизи Солнца, эта дополнительная задержка составляет около  $2 \cdot 10^{-4}$  с. В 50-х годах

20-го века был выполнен эксперимент по измерению временной задержки радарного сигнала, отражённого от Солнца [35]. Этот эксперимент также подтвердил предсказания общей теории относительности, и в настоящее время [18, т.5; с.193] он проверен с точностью около 0,1%.

На первый взгляд может показаться, что этот эксперимент опровергает постулированный нами Новый закон (2.1), из которого следует, что скорость света вблизи Солнца, наоборот, возрастает. Однако, как будет показано в § 4.11, явного противоречия здесь нет.

## **§ 4.4. Границы общей теории относительности**

Уравнения (4.2) общей теории относительности не содержат в явном виде ни массы Вселенной, ни плотности её распределения. С этой точки зрения *вся масса Вселенной практически никак не влияет ни на то, что происходит в околосолнечном пространстве, ни на то, что происходит где-либо в другом месте Вселенной*. Иначе говоря, пространство-время существует независимо от находящейся в нём материи, а материальные тела влияют *только* на его геометрию.

При этом также по умолчанию предполагается, что ни скорость света, ни постоянная Планка, ни масса покоя электрона (или массы покоя других элементарных частиц) не зависят от величины гравитационного потенциала, то есть не зависят от плотности распределения всей остальной материи во Вселенной. Вот что пишет об этом известный специалист по общей теории относительности Роберт Дикке: «В теории тяготения Эйнштейна ориентация инерциальной системы отсчёта относительно общего распределения масс обусловлена этим распределением. Но в этой теории, помимо указанной несколько тривиальной взаимосвязи, распределение материи во Вселенной вдали от лаборатории не приводит к другим эффектам, наблюдаемым в лаборатории» [26; с.14].

Предположение о том, что вся материя во Вселенной никак не влияет на протекание физических процессов, представляется,

по крайней мере, маловероятным. И можно отметить, что в научной литературе не раз высказывались предположения о том, что общая теория относительности не применима в случае сильных гравитационных полей. См. например [50;с.40,41].

А с точки зрения новой теории гравитационный потенциал Вселенной определяет такие фундаментальные параметры пространства-времени, как скорость света и постоянная Планка. Поэтому уравнения общей теории относительности применимы только в случае небольших изменений гравитационного потенциала:

$$|\Delta\Phi| \ll |\Phi| = c^2$$

когда изменением величины скорости света и постоянной Планка можно пренебречь.

Гравитационный потенциал, создаваемый всей массой Вселенной и определяющий величину скорости света в околоземном пространстве, равен:

$$|\Phi| = c^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2 \text{ с}^{-2}$$

А в гравитационном поле Солнца скорость света изменяется на очень незначительную в процентном отношении величину. И даже на поверхности Солнца, как нетрудно рассчитать из уравнения (2.4), изменение скорости света составит величину  $\Delta c = 600 \text{ м/с}$ , то есть  $\Delta c/c = 2 \cdot 10^{-6}$ .

Точность же экспериментов, подтверждающих общую теорию относительности (например, для релятивистских гравитационных тестов в Солнечной системе), существенно ниже и составляет приблизительно 0,1% [18, т.5; с.192,193].

Таким образом, по существующим экспериментальным данным (в том числе и по проверке общей теории относительности) нельзя сделать вывод о том, что распределение материи во Вселенной не влияет на величину скорости света.

Как уже отмечалось в § 1.3, в межгалактическом пространстве относительное изменение гравитационного потенциала также пренебрежимо мало, так как величина гравитационного потенциала практически полностью определяется удалёнными массами Вселенной. Однако при

расширении Вселенной изменение гравитационного потенциала будет очень существенным. Поэтому в этом случае следует учитывать изменение скорости света (2.1) и постоянной Планка (2.9), а также изменение масс элементарных частиц (3.21).

Можно отметить, что в современных космологических моделях никак не учитывается влияние распределения массы Вселенной на протекание астрофизических процессов. Возможно, именно поэтому и возникают многочисленные космологические проблемы. Некоторые из этих проблем мы рассмотрим в 9-й главе, а затем объясним их с новой точки зрения в 10-й главе.

## § 4.5. Принцип эквивалентности

Из-за того, что инертная масса тела тождественно равна его гравитационной массе, движение тел в гравитационном поле похоже на движение тел в неинерциальной системе отсчёта. И с точки зрения общей теории относительности это происходит потому, что гравитационное поле и неинерциальная система отсчёта тождественны по своей сути.

С точки зрения новой теории это не так. Гравитационное поле Вселенной *создаёт* окружающее нас пространство-время. Величины скорости света и постоянной Планка зависят от величины гравитационного потенциала. В неинерциальной же системе отсчёта величины скорости света и постоянной Планка не изменяются. Поэтому гравитационное поле принципиально отличается от неинерциальной системы отсчёта.

Например, при свободном движении частицы в неинерциальной системе отсчёта её масса покоя остаётся постоянной, а инертная масса изменяется в зависимости от скорости частицы (1.21).

Совершенно иначе происходит свободное движение частицы в гравитационном поле. В этом случае остаётся неизменной инертная масса частицы (3.7), а её масса покоя изменяется в зависимости от величины гравитационного потенциала (3.21).



Существуют и другие отличия между гравитационным полем и неинерциальной системой отсчёта. Например, если электрический заряд движется с ускорением, то он будет излучать электромагнитные волны. Поэтому заряд, покоящийся в неинерциальной системе отсчёта, будет излучать. Но заряд, который покоится в гравитационном поле – *не излучает*.

С другой стороны, из формулы (2.1), как было показано в § 3.2, следует равенство инертной и гравитационной масс. И только вследствие этого движение тел в неинерциальной системе отсчёта подобно движению тел в слабом гравитационном поле, когда изменением  $c$  и  $\hbar$  можно пренебречь.

В общей теории относительности предполагается, что гравитация только искривляет пространство-время. А с точки зрения новой теории гравитация определяет такие фундаментальные параметры пространства-времени, как скорость света и постоянная Планка. И оказывается, что с этой точки зрения можно дать принципиально новое толкование общей теории относительности.

*В гравитационном поле скорость света и постоянная Планка изменяются при переходе от одной точки пространства к другой. И в первом приближении (то есть когда  $\Delta\hbar \ll \hbar$ ,  $\Delta c \ll c$ ) этот эффект можно рассматривать как искривление пространства-времени.*

#### § 4.6. Отклонение световых лучей

Кривизна пространства-времени проявляется прежде всего в том, что искривляются траектории световых лучей, а также происходит гравитационное смещение спектральных линий. Эти эффекты отсутствуют в плоском пространстве-времени. То есть основной характеристикой, определяющей кривизну пространства-времени, являются траектории световых лучей [17;с.232].

Рассмотрим движение фотона в гравитационном поле с новой точки зрения. Световые лучи, проходящие вблизи Солнца, отклоняются на угол  $\alpha$  согласно уравнению (4.5). Величина этого

угла отклонения ровно в два раза превосходит величину угла отклонения света, рассчитанного в рамках ньютоновской теории тяготения (4.6). С точки зрения общей теории относительности в два раза большее отклонение светового луча объясняется кривизной пространства-времени.

А с точки зрения новой теории объяснение этого эффекта следующее. В § 3.5, используя формулу (2.1), мы установили, что при движении тела в гравитационном поле (если его скорость мала  $V \ll c$ ) только половина потенциальной энергии тела переходит в кинетическую энергию. Вторая же половина переходит во внутреннюю энергию (энергию покоя) тела.

В механике Ньютона отсутствует такое понятие, как энергия покоя. Поэтому при движении тела в гравитационном поле учитывают только изменение его кинетической энергии. И отсюда делается неверный вывод об изменении потенциальной энергии и о величине гравитационного потенциала. Величина гравитационного потенциала занижается ровно в два раза.

Фотон не имеет энергии покоя. Поэтому при движении фотона в гравитационном поле *вся* потенциальная энергия фотона переходит в его кинетическую энергию. Именно это и приводит к тому, что фотон отклоняется на угол, в два раза больший, чем следует из уравнения (4.6), что как раз и соответствует уравнению (4.5).

Можно также отметить следующее. Фотон (как и любой другой квантовый объект) обладает двойственной природой. Поэтому, с одной стороны, свет можно рассматривать как поток частиц, но, с другой стороны, свет – это электромагнитные волны. И в следующих параграфах мы рассчитаем отклонение луча света в гравитационном поле, рассматривая свет как движение электромагнитных волн.

## § 4.7. Распространение электромагнитных волн

В однородной среде свет (электромагнитные волны) движется из одной точки в другую по кратчайшему пути, то есть по прямой. А в неоднородной среде путь света искривлён, то есть

свет движется не по кратчайшему пути. В качестве единицы измерения пройденного светом пути мы можем выбрать любую величину. Но если мы будем измерять пройденный светом путь в единицах длины световой волны  $\lambda(\ell)$  (которая может изменяться вдоль траектории луча  $\ell$ ), то окажется, что и в неоднородной среде свет движется из точки  $A$  в точку  $B$  также по кратчайшему пути:

$$\int_A^B \frac{d\ell}{\lambda(\ell)} = \min \quad (4.8)$$

То есть свет будет двигаться из точки  $A$  в точку  $B$  таким образом, чтобы интеграл от  $\frac{d\ell}{\lambda(\ell)}$ , взятый вдоль траектории луча имел минимальное значение. Длина пути, пройденного светом и измеренная в единицах длины световой волны, называется оптической длиной пути. Поэтому из уравнения (4.8) следует, что свет движется так, чтобы оптическая длина пройденного им пути была минимальна.

Например, свет движется из точки  $A$  в точку  $B$  по кривой  $L$  (смотри рис. 5). В этом случае оптическая длина любой линии, проходящей через точки  $A$  и  $B$ , например линии  $L'$ , будет больше, чем оптическая длина линии  $L$ :

$$\int_A^B \frac{dL'}{\lambda(L')} > \int_A^B \frac{dL}{\lambda(L)} = \min$$

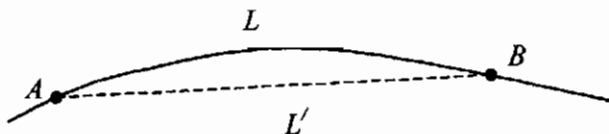


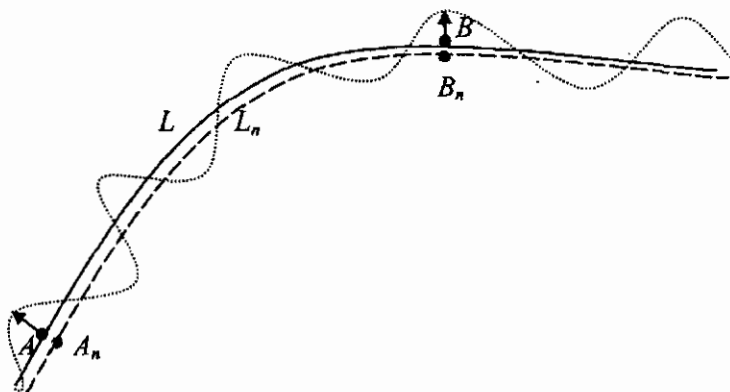
Рис. 5

Так как оптическая длина линии  $L$  минимальна, то оптическая длина любой линии, бесконечно близко расположенной к  $L$ , будет в первом приближении такая же, как и у  $L$ . Поэтому уравнение (4.8) можно представить в вариационном виде:

$$\delta \int_A^B \frac{d\ell}{\lambda(\ell)} = 0 \quad (4.9)$$

Это уравнение означает, что при бесконечно малом отклонении (вариации) подынтегрального выражения от истинной траектории движения изменение значения интеграла равно нулю.

Вариационное уравнение (4.9), описывающее распространение волны в неоднородной среде, имеет следующий физический смысл. Пусть некоторая волна распространяется вдоль линии  $L$  (смотри рис.6).



**Рис. 6.** В отличие от материальной точки волна движется сразу по всему семейству линий  $L_n$ , которые близко расположены к линии  $L$ . И если в точках  $A$  и  $B$  максимум интенсивности, то, следовательно, и в точках  $A_n$  и  $B_n$ , лежащих на линии  $L_n$ , также будет максимум интенсивности. Это означает, что вдоль любой линии  $L_n$ , близко расположенной к  $L$ , содержится одно и тоже число длин волн (одна и та же разность фаз). То есть оптическая длина всех линий  $L_n$  одинакова. Именно это и отражено в уравнении (4.9).

Рассмотрим точки  $A$  и  $B$ , лежащие на  $L$  и соответствующие максимумам интенсивности. В отличие от материальной точки волна движется не по математической линии  $L$ , а сразу по всему семейству линий  $L_n$ , которые достаточно близко расположены к  $L$ . И если в точках  $A$  и  $B$  максимум интенсивности, то, следовательно, и в точках  $A_n$  и  $B_n$  также будет максимум интенсивности. Но это как раз и означает, что волна будет двигаться по такому семейству линий  $L_n$ , у которых одна и та же оптическая длина (одна и та же разность фаз между точками  $B$  и  $A$ ), в соответствии с уравнением (4.9).

Учитывая что  $\lambda(\ell) = \frac{2\pi c(\ell)}{\omega(\ell)}$ , где  $c(\ell)$  – скорость распространения волны, а  $\omega(\ell) = 2\pi \cdot \nu(\ell)$  – циклическая частота колебаний волны ( $\nu$  – обычная частота колебаний), уравнение (4.8) можно представить в виде:

$$\int_A^B \frac{\omega(\ell)}{c(\ell)} d\ell = \min \quad (4.10)$$

Можно отметить, что при движении электромагнитной волны в какой-нибудь среде скорость её распространения может изменяться, но частота всегда остаётся постоянной, и поэтому её можно вынести из-под знака интеграла:

$$\int_A^B \frac{d\ell}{c(\ell)} = \min \quad (4.11)$$

Интеграл в этом уравнении – это время, которое требуется свету, чтобы попасть из точки  $A$  в точку  $B$  вдоль траектории  $\ell$ . То есть свет движется из точки  $A$  в точку  $B$  таким образом, чтобы затратить на свой путь минимум времени. Поэтому уравнение (4.11) называется принципом наименьшего времени (или принципом Ферма). Если это уравнение умножить на постоянную величину  $c_0$  (скорость света в вакууме в земных условиях), то его можно представить в виде:

$$\int_A^B \frac{c_0}{c(\ell)} d\ell = \int_A^B n(\ell) d\ell = \min \quad (4.12)$$

Величина  $n(\ell) = c_0/c(\ell)$  называется показателем преломления среды.

Но при движении электромагнитной волны в гравитационном поле её частота изменяется, и поэтому принцип наименьшего времени (4.11) уже неприменим для нахождения траектории движения. В этом случае для нахождения траектории нужно воспользоваться более фундаментальным принципом, выраженным в виде уравнения (4.9) или (4.10).

Из уравнения (3.9) следует, что при движении электромагнитной волны в гравитационном поле будет оставаться постоянной величина  $\frac{\hbar\omega}{c^2}$ . А так как величина постоянной Планка изменяется обратно пропорционально величине скорости света (2.8), то, следовательно, будет оставаться постоянной величина  $\frac{\omega}{c^3}$ . Таким образом:  $\frac{\omega}{c} \sim c^2$ , и уравнение (4.10) можно представить в виде:

$$\int_A^B c^2 d\ell = \min \quad (4.13)$$

Или также, учитывая (2.1), в виде:

$$-\delta \int_A^B \Phi d\ell = 0 \quad (4.14)$$

В гравитационном поле, создаваемом массой  $M$ , уравнение (4.14) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} -\delta \int \Phi d\ell &= -\delta \int (\Phi_0 + \Delta\Phi) d\ell = \delta c_0^2 \int \left(1 + \frac{2GM}{rc_0^2}\right) d\ell = 0 \Rightarrow \\ \delta \int \left(1 + \frac{2GM}{rc_0^2}\right) d\ell &= 0 \end{aligned} \quad (4.15)$$

Здесь  $c_0$ ,  $\Phi_0$  – скорость света и гравитационный потенциал Вселенной на достаточно большом удалении от массы  $M$ :

$$c_0^2 = -\Phi_0$$

Итак, исходя из общего принципа (4.9), определяющего распространение волны, мы получили уравнения (4.13), (4.14) и (4.15), определяющих распространение электромагнитных волн в гравитационном поле. В следующем параграфе, используя эти уравнения, мы рассчитаем отклонение света в гравитационном поле Солнца и сравним полученный результат с экспериментальными данными.

## § 4.8. Показатель преломления

Уравнение (4.12) описывает распространение света в неоднородной среде, а уравнение (4.13) описывает распространение света в гравитационном поле. Тем не менее, с математической точки зрения они полностью эквивалентны. Поэтому величину  $c^2$ , стоящую под знаком интеграла в уравнении (4.13), можно рассматривать как эффективный показатель преломления.

Напомним, что при переходе из среды с показателем преломления  $n_1$  в среду с показателем преломления  $n_2$  свет отклоняется (смотри рис. 7). При этом:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (4.16)$$

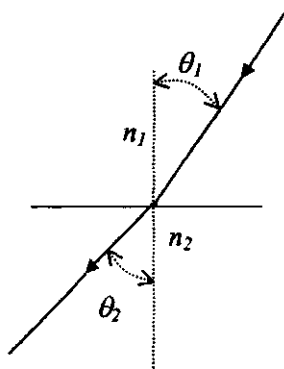
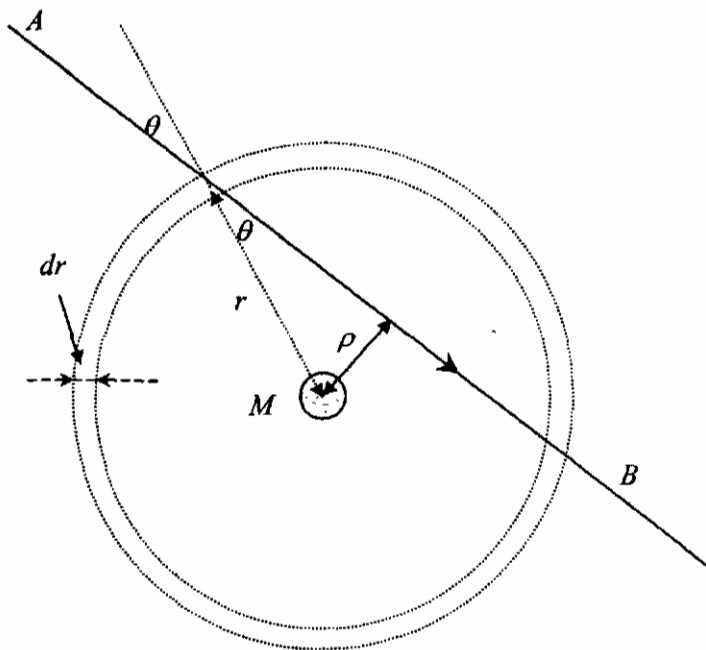


Рис. 7. При переходе из среды с показателем преломления  $n_1$  в среду с показателем преломления  $n_2$  луч света отклоняется.

Здесь углы  $\theta_1$  и  $\theta_2$  отсчитываются от нормали к поверхности, разделяющей две среды. Уравнение (4.16) носит название закона Снелла, оно легко выводится из принципа наименьшего времени Ферма [8;с.9-13].

Пространство, окружающее Солнце, можно мысленно разбить на систему равноудалённых от центра Солнца бесконечно тонких сфер толщиной  $dr$  (см. рис. 8).



**Рис. 8.** Луч света проходит на расстоянии  $\rho$  от центра Солнца. Он движется практически по прямой линии  $AB$ . Тем не менее, каждый раз, когда луч проходит под углом  $\theta$  бесконечно тонкий слой сферы  $dr$ , находящийся на расстоянии  $r$  от центра Солнца, он отклоняется на бесконечно малый угол  $d\alpha$ . Эффективный показатель преломления на каждой сфере равен:

$$n(r) = c_0^2 + 2GM/r$$



Показатель преломления на такой сфере будет равен:

$$n(r) = c^2(r) = c_0^2 + 2GM/r$$

где  $c_0$  – скорость света на достаточно большом удалении от Солнца, а  $r$  – радиус сферы.

Гравитационное поле Солнца является слабым, то есть в нём  $\Delta\Phi/\Phi_0 \ll 1$ , и, следовательно,  $\Delta c/c \ll 1$ . В результате, свет движется практически по прямой линии  $AB$ . Тем не менее, каждый раз при переходе из сферы с показателем преломления  $n$  в следующую сферу с показателем преломления  $n+dn$  свет отклоняется на бесконечно малый угол  $d\alpha$ . Учитывая уравнение (4.16), получаем:

$$n \sin\theta = (n + dn)\sin(\theta + d\alpha)$$

Так как  $\sin(\theta + d\alpha) = \sin\theta + \sin'\theta d\alpha = \sin\theta + \cos\theta d\alpha$ ,

то, следовательно:  $n \sin\theta = (n + dn)(\sin\theta + \cos\theta d\alpha) =$   
 $= n \sin\theta + \sin\theta dn + n \cos\theta d\alpha + \cos\theta dn d\alpha$ .

Пренебрегая членом второго порядка малости ( $\cos\theta dn d\alpha$ ), получаем:  $\sin\theta dn = -n \cos\theta d\alpha \Rightarrow$

$$d\alpha = -\operatorname{tg}\theta \frac{dn}{n} \quad (4.17)$$

$$\frac{dn}{n} = \frac{d(c^2)}{c^2} = \frac{1}{c^2} d\left(\frac{2GM}{r}\right) = \frac{1}{c^2} d\left(\frac{2GM}{\rho} \sin\theta\right) = \frac{2GM}{\rho c^2} \cos\theta d\theta$$

Здесь учтено, что  $r = \rho/\sin\theta$ , где  $\rho$  – прицельный параметр, то есть минимальное расстояние от центра Солнца до прямой  $AB$ . И, следовательно:

$$d\alpha = -\frac{2GM}{\rho c^2} \sin\theta d\theta$$

Знак минус означает, что возрастание угла  $\alpha$  уменьшает угол  $\theta$ , то есть луч света “притягивается” к Солнцу. При движении луча угол  $\theta$  меняется от нуля до  $\pi$ , и, следовательно, в общей сложности луч света отклонится на угол  $\alpha$  равный:

$$\alpha = -\frac{2GM}{\rho c^2} \int_0^\pi \frac{\sin\theta}{c^2} d\theta$$

Так как скорость света изменяется в гравитационном поле Солнца на очень незначительную в процентном отношении величину, то её можно вынести из-под знака интеграла. А

учитывая, что  $\int_0^\pi \sin \theta \, d\theta = -(\cos \pi - \cos 0) = 2$ , в результате

получаем:

$$\alpha = -\frac{4GM}{\rho c^2} \quad (4.18)$$

Подставляя в (4.18) численные значения величин (так как луч проходит вблизи Солнца, то вместо  $\rho$  подставляем величину радиуса Солнца), получаем:

$$|\alpha| = \frac{4 \cdot 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ кг}^{-1} \text{ м}^3 \text{ с}^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}}{7 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2} = 0,85 \cdot 10^{-5} \text{ рад} = 1,75 \text{ сек}$$

То есть при прохождении вблизи Солнца луч света отклонится всего на 1,75 угловых секунды. Это очень незначительное отклонение.

Итак, предполагая, что в гравитационном поле изменяются величины скорости света и постоянной Планка, мы получили уравнение (4.14), описывающее распространение электромагнитных волн. А в случае слабого гравитационного поля мы нашли величину угла отклонения (4.18), которое, как уже отмечалось ранее, проверено в гравитационном поле Солнца с точностью около 0,1%.

## § 4.9. Смещение спектральных линий

Из эксперимента известно, что существует эффект гравитационного смещения спектральных линий (4.4). С точки зрения общей теории относительности этот эффект вызван тем, что в разных точках гравитационного поля время течёт по-разному.

Мы же предполагаем, что в разных точках гравитационного поля различны величины скорости света и постоянной Планка. Кроме того, масса покоя элементарной

частицы также зависит от величины гравитационного потенциала (3.21). Давайте рассчитаем гравитационное смещение спектральных линий с новой точки зрения.

Уровни энергии  $E_n$  атома водорода имеют дискретный спектр значений и определяются формулой Бора [6;с.306]:

$$E_n = -\frac{me^4}{2\hbar^2(1+m/m_p) \cdot n^2} \quad (4.19)$$

здесь  $m$  – масса электрона, а  $m_p$  – масса протона.

При переходе электрона с уровня  $E_n$  на уровень  $E_k$  ( $n > k$ ) излучается фотон с энергией:

$$\varepsilon = \hbar\omega = E_n - E_k$$

и частотой:

$$\omega = (E_n - E_k)/\hbar$$

Введём обозначение:

$$Z = \frac{e^4}{2(1+m/m_p)} \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right)$$

и получим:

$$\omega = Zm/\hbar^3$$

Такое обозначение для нас удобно, так как величина  $Z$  не зависит от гравитационного потенциала.

В областях пространства с гравитационным потенциалом  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  соответственно будет:  $\omega_1 = Zm_1/\hbar_1^3$  и  $\omega_2 = Zm_2/\hbar_2^3$

Из уравнения (3.21) следует:  $m_2 = m_1 \frac{\sqrt{-\Phi_1}}{\sqrt{-\Phi_2}}$

А из уравнения (1.2) следует:  $\hbar_2 = \hbar_1 \frac{\sqrt{-\Phi_1}}{\sqrt{-\Phi_2}}$

В результате получаем:

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} \quad (4.20)$$

Как видно из уравнения (4.20), частота излучения атома будет тем выше, чем “глубже” находится атом в гравитационном

поле. Например, на Солнце ( $\Phi_1$ ) частоты излучения атомов выше, чем на Земле ( $\Phi_2$ ).

Однако в данном случае нас интересует следующее. Какая частота будет у фотона, испущенного на Солнце (потенциал  $\Phi_1$ ), когда он уже долетит до Земли (потенциал  $\Phi_2$ )? Ведь пока фотон летит в гравитационном поле, его частота изменяется.

Как следует из уравнения (3.9), при движении фотона в гравитационном поле будет сохраняться его инертная масса, то есть величина:  $\hbar\omega/c^2 = \text{const}$ . И, следовательно, когда фотон достигнет Земли, он уже будет иметь частоту  $\omega_{12}$ . При этом:

$$\hbar_1\omega_1/c_1^2 = \hbar_2\omega_{12}/c_2^2$$

Учитывая (2.1) и (2.9), получаем: 
$$\frac{\omega_{12}}{\omega_1} = \frac{\hbar_1 c_2^2}{\hbar_2 c_1^2} = \left(\frac{\Phi_2}{\Phi_1}\right)^{3/2}$$

Выражая  $\omega_1$  через  $\omega_2$ , из уравнения (4.20) получаем:

$$\omega_{12} = \omega_2 \sqrt{\frac{\Phi_2}{\Phi_1}} \quad (4.21)$$

Напомним, что  $\omega_2$  – частота излучения спектральной линии в области с потенциалом  $\Phi_2$ . А  $\omega_{12}$  – частота той же спектральной линии, но испущенной в области с потенциалом  $\Phi_1$  и наблюдаемой в области с потенциалом  $\Phi_2$ .

Из уравнения (4.21) следует, что если  $|\Phi_2| < |\Phi_1|$  или, что то же самое  $\Phi_2 > \Phi_1$ , то:

$$\omega_{12} < \omega_2$$

Это означает, что земной наблюдатель увидит спектр излучения атома водорода, находящегося на Солнце, смещённым в сторону красных частот.

Рассчитаем изменение частоты света в случае слабого гравитационного поля. Обозначим  $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$  и  $\Delta\omega = \omega_{12} - \omega_2$ , тогда:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_2} = \frac{\omega_{12}}{\omega_2} - 1 = \sqrt{\frac{\Phi_2}{\Phi_1}} - 1 = \sqrt{1 + \frac{\Delta\Phi}{\Phi_1}} - 1$$

Учитывая, что  $|\Delta\Phi| \ll c^2$ , получаем:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_2} = \frac{\Delta\Phi}{2\Phi_1} = -\frac{\Delta\Phi}{2c^2} \quad (4.22)$$

А так как  $-\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = 2(\varphi_1 - \varphi_2)$ , то получается, что уравнение для гравитационного смещения спектральных линий (4.22) эквивалентно уравнению (4.4), которое экспериментально проверено с точностью около 0,1%.

Учитывая сказанное в предыдущих параграфах, можно сделать следующий вывод. В слабых гравитационных полях, когда  $|\Delta\Phi| \ll c^2$ , новая модель пространства-времени приводит к тем же уравнениям что и общая теория относительности для отклонения луча света и для смещения спектральных линий.

## § 4.10. Чёрные дыры

В общей теории относительности величина скорости света есть абсолютная константа. Именно поэтому возможно существование массивных объектов, из поля тяготения которых не может вылететь даже свет. Такие объекты называются чёрными дырами. Следует отметить, что в классической механике также существует понятие чёрной дыры – массивного тела, на поверхности которого вторая космическая скорость больше, чем скорость света [18, т.5; с.452].

А с точки зрения новой теории *чёрные дыры не существуют*, так как величина скорости света *возрастает* вблизи массивных тел (2.1).

Разберём этот вопрос подробнее. Полная энергия тела, имеющего инертную массу  $m_{in}$ , равна  $E = m_{in} c^2$ . И для того чтобы телу вылететь из поля притяжения большой массы, ему нужно затратить часть своей энергии. Поэтому если энергия гравитационного притяжения больше, чем полная энергия тела, то тело ни при каких условиях не сможет вылететь из такого поля. Даже если, например, в результате внутренних процессов тело аннигилирует, то есть превратится в свет, то этот свет также не вылетит за пределы гравитационного поля. Ему просто не хватит энергии для этого.

С новой же точки зрения ситуация в корне меняется. Ведь любое тело обладает энергией только потому, что находится в окружении масс Вселенной. И чем “глубже” находится тело в гравитационном поле, *тем больше* внутренняя энергия тела.

Полная энергия тела в точности равна его гравитационной энергии притяжения ко всем остальным телам Вселенной. Поэтому она всегда больше, чем энергия притяжения к какому-то одному, пусть и очень большому, телу.

Рассмотрим, например, область пространства с гравитационным потенциалом  $\Phi_0$ . Пусть на некотором удалении от неё находится огромная масса  $M$ , на поверхности которой величина гравитационного потенциала равна  $\Phi$  ( $\Phi < \Phi_0$ ,  $|\Phi| > |\Phi_0|$ ).

При каком значении потенциала  $\Phi$  фотон сможет вылететь из гравитационного поля массы  $M$ ?

Фотон обладает энергией  $\varepsilon$ , а, значит, он обладает и инертной, и гравитационной массой равной:  $\mu = \varepsilon/c^2$ . Для того чтобы фотону вылететь из области с потенциалом  $\Phi$  и попасть в область с потенциалом  $\Phi_0$ , ему нужно совершить работу:

$$A = \mu(\Phi_0 - \Phi) = \frac{\varepsilon}{c^2}(\Phi_0 - \Phi) \quad (4.23)$$

В общей теории относительности (как и в механике Ньютона) скорость света считается постоянной величиной. Поэтому из уравнения (4.23) следует, что если:  $(\Phi_0 - \Phi) > c^2$ , то:

$$A > \varepsilon.$$

Это означает, что работа, которую нужно затратить фотону на преодоление сил притяжения, больше, чем вся его энергия. Следовательно, в этом случае фотон не сможет вылететь из гравитационного поля массы  $M$ .

С новой же точки зрения на поверхности массы  $M$  скорость света будет равна:  $c^2 = |\Phi|$ . Это означает, что:

$$\Phi_0 - \Phi = c^2 - c_0^2 < c^2$$

Поэтому, как видно из уравнения (4.23), при любом значении  $\Phi$ :

$$A < \varepsilon$$

Это означает, что фотону хватит энергии, чтобы преодолеть притяжение любого гравитационного поля.

Поэтому могут существовать огромные массы – источники мощного электромагнитного излучения. Например, в ядрах активных галактик. Спектры такого излучения будут сильно смещены в инфракрасную область.

### § 4.11. Задержка радиосигнала

В §§ 4.6–4.9 мы рассмотрели движение электромагнитных волн (фотонов) в гравитационном поле с точки зрения новой теории. В результате для слабого поля ( $|\Delta\Phi| \ll c^2$ ) получили уравнения для отклонения луча света (4.18) и для смещения спектральных линий (4.22), совпадающие с соответствующими уравнениями общей теории относительности. И так как «уравнение распространения фронта волны является основной характеристикой свойств пространства и времени» [17;с.232], то можно сделать следующий вывод. *В гравитационном поле скорость света и постоянная Планка изменяются при переходе от одной точки пространства к другой. И в первом приближении (то есть когда  $\Delta\hbar \ll \hbar$ ,  $\Delta c \ll c$ ) этот эффект можно рассматривать как искривление пространства-времени.*

Что касается эффекта Шапиро, то по этому поводу можно сказать следующее. Если бы в данном эксперименте непосредственно сравнивались между собой скорость света вблизи Солнца и вдали от него, то тогда из эксперимента можно было бы сделать однозначный вывод о том, что скорость света в гравитационном поле уменьшается. Но в данном эксперименте время полёта радиосигнала до Солнца и обратно сравнивалось с *расчётным* временем полёта радиосигнала в пустом пространстве.

Давайте внимательно разберём этот эксперимент (его описание приводится, например, в книге С. Вейнберга «Гравитация и космология»). Когда Земля, Солнце и Меркурий находились практически на одной прямой (при этом Солнце находилось между Землёй и Меркурием), с Земли на Меркурий был послан радиосигнал. Этот сигнал прошёл вблизи Солнца, достиг поверхности Меркурия и, отразившись от него, вернулся

обратно на Землю. Время полёта радиосигнала можно измерить с очень высокой степенью точности. Но как измерить с высокой степенью точности расстояние от Земли до Меркурия?

Погрешность, с которой необходимо было знать это расстояние в данном эксперименте, не должна была превышать 1,5 км! Начнём с того, что сигнал отражался не от одной зеркальной точки на поверхности Меркурия, а от площадки вполне определённого размера, поэтому момент прибытия сигнала был известен с точностью до нескольких сот микросекунд [36;с.220]. Но даже не это являлось принципиальной трудностью для проведения данного эксперимента. Принципиальная трудность заключалась в другом. Как определить “истинное” расстояние от Земли до Солнца и от Солнца до Меркурия? Как узнать с высокой степенью точности время, за которое радиосигнал прошёл бы эти расстояния в отсутствие гравитационного поля Солнца? Мы ведь не можем “выключить” гравитационное поле Солнца и измерить время, необходимое свету для того, чтобы долететь до Солнца и вернуться обратно.

А так как “истинные” расстояния от Земли до Солнца и от Солнца до Меркурия в данном эксперименте не были известны, то вместо них в расчётах использовались различные параметры. «Эти параметры были затем определены подгонкой наблюдаемого времени движения радиосигнала до Меркурия и обратно по теоретическим формулам» [36;с.221].

Поэтому из данного эксперимента нельзя сделать однозначный вывод о том, что скорость света в гравитационном поле уменьшается. Из него можно только сделать вывод, что уравнения общей теории относительности (4.3) выполняются в гравитационном поле Солнца с точностью около 0,1%.

Следует отметить, что именно из уравнения (4.3) в рамках общей теории относительности делается вывод, что в гравитационном поле скорость света уменьшается. В 7-й главе на основе новой теории, в том числе используя предположение о том, что скорость света в гравитационном поле увеличивается, мы сформулируем *квантовую* теорию гравитации. При этом



выражение для квадрата интервала, которое мы рассчитаем на основе новой теории в слабом гравитационном поле, будет совпадать с выражением для квадрата интервала в общей теории относительности (4.3) с точностью до членов порядка  $\Delta\Phi^2/c^4$ . И, таким образом, из результатов эксперимента, проведённого Шапиро, в рамках квантовой теории гравитации уже можно будет сделать вывод о том, что скорость света в гравитационном поле, наоборот, возрастает.

Но прежде чем приступить к формулировке квантовой теории гравитации, мы внимательно исследуем “странное” поведение квантовых объектов. Этому будут посвящены две последующие главы.

## Глава 5

# Парадоксы

# Квантовой Механики

Эта глава целиком посвящена описанию наиболее ярких квантово-механических парадоксов, а также качественному анализу основных понятий, лежащих в фундаменте квантовой механики. Цель этой главы – наглядно показать *принципиальное* отличие физики микромира от привычной для нас физики макромира.

### § 5.1. История квантовой механики

В 1900 году Макс Планк, исследуя различные эмпирические формулы для излучения, смог интуитивно угадать закон излучения абсолютно чёрного тела. Для того чтобы как-то теоретически обосновать этот закон, Планк предположил, что энергия излучается квантами (порциями). При этом энергия каждого кванта равна:  $\varepsilon = h\nu$ , где  $\nu$  – частота излучения, а  $h \approx 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – новая постоянная величина, имеющая размерность действия и названная впоследствии постоянной Планка. В связи с этим 1900 год считается годом рождения квантовой механики. В настоящее время выражение для энергии фотона обычно пишется в виде:  $\varepsilon = \hbar\omega$ , где  $\omega$  – так называемая циклическая частота, она равна  $\omega = 2\pi\nu$ , а величина  $\hbar = h/2\pi$  – также называется постоянной Планка.

Следующий шаг в развитии квантовой механики был сделан в 1905 году Альбертом Эйнштейном. Изучая закон излучения Планка, Эйнштейн пришёл к выводу, что электромагнитное излучение не только излучается квантами, но также переносится и поглощается квантами. Иначе говоря, свет представляет собой поток частиц – фотонов. Используя это предположение, Эйнштейн смог очень просто объяснить и количественно описать такое необычное для того времени явление как фотоэффект.

Суть фотоэффекта состоит в том, что свет, падающий на какой-либо металл, выбивает электроны из его поверхности. Этот эффект был случайно открыт Герцем в 1887 году, когда он исследовал электромагнитные волны, предсказанные теорией Максвелла. Как показали эксперименты, кинетическая энергия выбитых электронов не зависит от интенсивности падающего на металл излучения, но возрастает с увеличением частоты излучения. Это свойство фотоэффекта не объяснимо в рамках классической электродинамики, но оно легко объяснимо, если предположить, что свет представляет собой поток частиц. Вот уравнение, которое было предложено Эйнштейном для объяснения фотоэффекта [14;с.81]:

$$K = \hbar\omega - W \quad (5.1)$$

Здесь  $\hbar\omega$  – энергия падающего на металл фотона,  $K$  – кинетическая энергия выбитого электрона, а  $W$  – работа выхода, то есть минимальная энергия, необходимая для выбивания электрона за пределы поверхности металла (она зависит от типа металла и состояния его поверхности).

Можно отметить, что ещё Исаак Ньютон считал, что свет представляет собой поток частиц. Из-за авторитета Ньютона это предположение довольно долго существовало в физике. Но в девятнадцатом веке было экспериментально установлено, что свет имеет волновую природу. Кроме того, из полученных Максвеллом электродинамических уравнений следовало, что колебания электромагнитного поля должны распространяться в пустоте со скоростью света. И вскоре электромагнитные волны были экспериментально обнаружены Герцем. Поэтому в начале

двадцатого века никто из учёных не сомневался в том, что свет имеет волновую природу. И никто, даже Планк, не принял всерьёз гипотезу Эйнштейна о том, что свет состоит из частиц. Отрицательное отношение физиков изменилось лишь в 1922 году, после открытия эффекта Комптона (изменения длины волны рентгеновских лучей, обусловленное упругим рассеянием фотонов на электронах) [28;с.45].

В 1909 году Эрнст Резерфорд провёл ряд опытов по рассеянию  $\alpha$ -частиц очень тонкой золотой фольгой. Эти знаменитые эксперименты дали основание Резерфорду высказать следующее предположение об устройстве атома. Атом состоит из очень маленького положительно заряженного ядра (примерно  $10^{-14}$  м), в котором сосредоточена практически вся масса атома, и это ядро окружено облаком из отрицательно заряженных электронов (примерно  $10^{-10}$  м).

Открытие Резерфорда поставило перед физиками новую проблему: почему атомы стабильны? Дело в том, что с точки зрения классической электродинамики электроны, вращаясь вокруг ядра, должны были бы непрерывно излучать электромагнитные волны. «Излучая, электроны теряли бы свою энергию, что должно было бы привести, в конце концов, к их падению на ядро. Таким образом, согласно классической электродинамике, атом был бы неустойчивым, что ни в какой степени не соответствует действительности» [6;с.13].

В 1913 году Нильс Бор для объяснения феномена устойчивости атомов предложил модель атома, основанную на следующих постулатах.

1) Электрон движется вокруг ядра по круговой орбите под действием кулоновской силы и в соответствии с законами Ньютона.

2) Электрон может двигаться только по такой орбите, на которой момент импульса электрона  $L$  равен целому числу, умноженному на постоянную Планка:

$$L = mVr = n\hbar \quad n = 1, 2, 3, 4 \dots \quad (5.2)$$

Здесь  $m$  – масса электрона,  $V$  – скорость с которой он движется по орбите, а  $r$  – радиус орбиты.

3) Двигаясь по такой орбите, электрон *не излучает*.

4) При переходе электрона с орбиты с порядковым номером  $k$  на орбиту с номером  $\ell$  ( $k > \ell$ ) излучается фотон с частотой  $\omega$ :

$$\omega = \frac{E_k - E_\ell}{\hbar} \quad (5.3)$$

Здесь  $E_k$  – энергия электрона на орбите  $k$ , а  $E_\ell$  – его энергия на орбите  $\ell$ .

Модель атома, предложенная Бором, хорошо объясняла свойства и спектр атома водорода, а также водородоподобных атомов (то есть атомов, у которых на внешней электронной оболочке находится только один электрон). Но постулаты, лежащие в основе этой модели, не имели никакого теоретического обоснования, и, кроме того, противоречили законам классической электродинамики. Поэтому большинство физиков отнеслось к новой модели скептически.

Следующий важный шаг в становлении квантовой механики был сделан в 1923 году Луи де Бройлем. Исходя из того, что световые волны имеют корпускулярную природу, а также предполагая симметрию в природе, он предположил, что и частицы, например электрон, должны проявлять волновые свойства. Например, фотон обладает энергией  $\varepsilon = \hbar\omega$  и импульсом  $p = \varepsilon/c = \hbar\omega/c$ . С другой стороны, с фотоном связан некоторый волновой процесс с длиной волны  $\lambda$ , равной  $\lambda = c/v = 2\pi c/\omega = 2\pi\hbar/p$ . Поэтому Луи де Бройль предположил, что не только с фотоном, но и с любой частицей, имеющей импульс  $p$ , связан некоторый волновой процесс с длиной волны  $\lambda$ . При этом:

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} \quad (5.4)$$

И уже через два года гипотеза де Бройля была экспериментально подтверждена в опытах по дифракции электронов.

Исходя из того, что электрон обладает волновыми свойствами (5.4), де Бройль очень просто объяснил

существование стационарных орбит в боровской модели атома. Стационарная орбита – это такая орбита, на которой укладывается целое число волн. То есть электрон, вращаясь вокруг ядра, образует как бы стоячую волну. «Гипотеза де Бройля, устанавливающая связь между частицами и волновыми процессами, поражала своей простотой и новизной подхода к решению противоречия волна-частица. Эта идея была настолько нова, что, несмотря на экспериментальное подтверждение, которое последовало очень быстро, потребовалось определенное время, чтобы она получила всеобщее признание среди физиков» [14;с.107].

Основываясь на идеях де Бройля, в 1926 году Эрвин Шрёдингер написал своё знаменитое волновое уравнение, описывающее движение частицы в поле  $U(x,y,z)$  [6;с.72]:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right) + U(x,y,z) \cdot \Psi \quad (5.5)$$

Здесь  $m$  – масса частицы,  $i$  – мнимая единица, а  $\Psi(x,y,z,t)$  – шрёдингеровская волновая комплексная функция (амплитуда волны де Бройля). Вероятность же обнаружить частицу в малой части объёма  $dV = dx dy dz$  в момент времени  $t$  равна  $dW = |\Psi(x,y,z,t)|^2 dx dy dz$ . То есть плотность вероятности пропорциональна квадрату модуля волновой функции. При этом:  $\iiint |\Psi(x,y,z,t)|^2 dx dy dz = 1$ . Можно отметить, что вероятность обнаружить частицу в какой-нибудь данной точке пространства всегда равна нулю, потому что объём точки равен нулю. То есть имеет смысл говорить только о *плотности вероятности* нахождения частицы в данной точке.

Если  $\Psi$ -функция известна в начальный момент времени, то из уравнения Шрёдингера можно найти  $\Psi$ -функцию в последующие моменты времени. И в принципе это уравнение способно объяснить все атомные явления, кроме тех, которые связаны с магнетизмом и теорией относительности. Оно может быть применимо и для системы, состоящей из многих частиц. Волновую  $\Psi$ -функцию, которая отлична от нуля только в

некоторой небольшой области пространства, иногда называют волновым пакетом.

Наконец, в 1927 году Вернер Гейзенберг, пытаясь устранить противоречие “волна-частица”, сформулировал принцип неопределённости (соотношение неопределённостей). Этот принцип выражает фундаментальный предел возможности одновременного измерения положения частицы и её импульса [6;с.68]:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2 \quad (5.6)$$

Здесь  $\Delta x$  – неопределённость в положении частицы, а  $\Delta p_x$  – неопределённость в проекции её импульса вдоль оси  $x$ .

Не сразу стало ясно, что именно выражает это соотношение. Только ли принципиальную невозможность получить более полное знание о движении частицы или же *объективную неопределённость* в её движении.

Аналогично соотношению (5.6) Гейзенберг также установил соотношение для неопределённости в измерении энергии частицы  $\Delta E$  и промежутка времени  $\Delta t$ , в течение которого производится данное измерение:

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar/2 \quad (5.7)$$

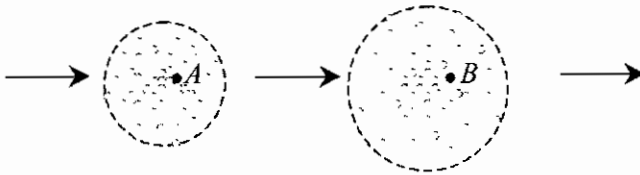
## § 5.2. Волновая $\Psi$ -функция

В основе механики Ньютона лежит представление о теле как о материальной точке (в том случае, когда размерами тела можно пренебречь), которая движется в пространстве по вполне определённой траектории – математической линии (то есть бесконечно тонкой линии). А законы Ньютона позволяют написать уравнение траектории. Если размерами тела пренебречь нельзя, то можно рассматривать центр масс тела, который в каждый момент времени находится в определённой точке пространства. И движение центра масс происходит по непрерывной траектории в соответствии с законами Ньютона. Механика Ньютона вполне наглядна и в этом смысле проста для понимания.

А с точки зрения квантовой механики движение электрона (или другой частицы) нельзя рассматривать как движение по какой-либо траектории [6; с.14,15]. С точки зрения квантовой механики движение электрона может быть полностью описано с помощью волновой  $\Psi$ -функции.

Давайте разберём этот вопрос на конкретном примере. Предположим, электрон движется в пространстве и проходит сначала точку  $A$ , а затем точку  $B$  (смотри рис. 9). Это означает, что до какого-то момента времени вероятность обнаружить электрон в окрестности точки  $A$  была равна нулю. Затем, начиная с некоторого момента времени, вероятность обнаружить электрон в окрестности точки  $A$  стала отлична от нуля, и в течение некоторого промежутка времени она возрастала до максимума. А затем, в течение некоторого времени, вероятность обнаружить электрон в окрестности точки  $A$  опять уменьшилась до нуля. Общее время  $\Delta t_A$  прохождения электроном точки  $A$  можно оценить так:

$$\Delta t_A \approx \frac{\Delta x_A}{\langle V_x \rangle} \quad (5.8)$$



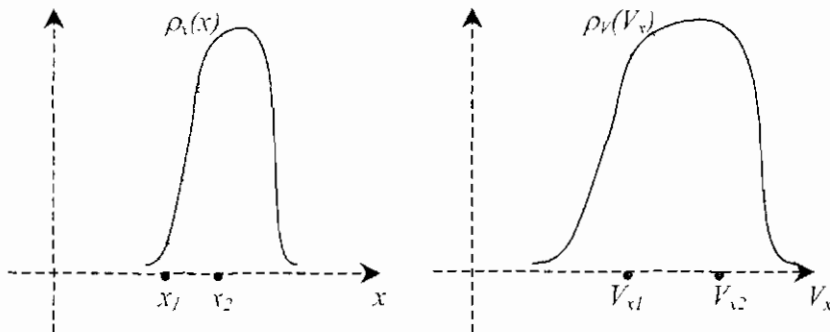
**Рис. 9.** Движение электрона можно схематично изобразить в виде движения облака (размеры облака определяются объёмом пространства, в котором волновая  $\Psi$ -функция отлична от нуля), состоящего из виртуальных электронов. И с точки зрения квантовой механики невозможно определить, в какой момент времени электрон прошёл точку  $A$ . Можно только рассчитать интервал времени  $\Delta t_A$ , в течение которого существует вероятность обнаружить электрон в окрестности точки  $A$ . Пока облако движется из точки  $A$  в точку  $B$ , его размеры увеличиваются, происходит так называемое распыление волнового пакета.



здесь  $\Delta x_1$  – размер области, в которой  $\Psi$ -функция, описывающая движение электрона, отлична от нуля (в то время, когда электрон проходит точку 1);  $\langle V_x \rangle$  – средняя скорость электрона вдоль оси  $x$  (вдоль направления движения), она остаётся неизменной при движении электрона.

Аналогичным образом электрон проходит точку  $B$ . При этом, пока электрон движется из точки  $A$  в точку  $B$ , размеры области, в которой  $\Psi$ -функция отлична от нуля, увеличиваются, происходит так называемое расплывание волнового пакета.

Расплывание волнового пакета происходит потому, что электрон (или любая другая частица) не только не имеет точной координаты своего местоположения в пространстве, но он также не имеет и определённой скорости движения. И в каждый момент времени электрон обладает непрерывным спектром скоростей в некотором интервале (смотри рис. 10). На рисунке условно изображён график  $\rho_x(x)$  – распределение плотности вероятности того, что электрон окажется в точке  $x$ , и график  $\rho_V(V_x)$  – распределение плотности вероятности того, что электрон будет иметь скорость  $V_x$  (скорость электрона вдоль оси  $v$ ).



**Рис. 10** В каждый момент времени электрон не имеет ни точной координаты своего местоположения, ни точно определенной скорости движения. Он как бы "размазан" и в обычном пространстве (слева), и в пространстве скоростей (справа)

Вероятность  $W(x_1, x_2)$  обнаружить электрон в промежутке между точками  $x_1$  и  $x_2$  равна:

$$W(x_1, x_2) = \int_{x_1}^{x_2} \rho_x(x) dx \quad (5.9)$$

А вероятность  $W(V_{x1}, V_{x2})$  того, что электрон будет иметь скорость в интервале скоростей  $(V_{x1}, V_{x2})$  равна:

$$W(V_{x1}, V_{x2}) = \int_{V_{x1}}^{V_{x2}} \rho_V(V_x) dV_x \quad (5.10)$$

Зная волновую  $\Psi$ -функцию, описывающую движение электрона, всегда можно рассчитать не только распределение  $\rho_x(x)$ , но и распределение  $\rho_V(V_x)$ . То есть можно рассчитать распределение плотности вероятности местонахождения электрона и в обычном пространстве, и в пространстве скоростей. Вообще говоря, в квантовой механике принято говорить о распределении плотности вероятности местонахождения электрона в фазовом пространстве – пространстве координат и импульсов  $(x, y, z, p_x, p_y, p_z)$ .

Ширина распределения  $\rho_x(x)$  и ширина распределения  $\rho_V(V_x)$  связаны между собой через соотношение неопределённости Гейзенберга (5.6).

Электрон может получить более точную координату своего местоположения только в результате взаимодействия с классическим прибором (объектом, неопределённость в местоположении которого достаточно мала). При этом размеры виртуального облака уменьшаются практически до нуля, происходит так называемая редукция волновой функции. Этот процесс будет рассмотрен в § 6.5.

### § 5.3. Две интерпретации квантовой механики

Сразу же с момента завершения создания квантовой механики в научном мире разгорелись ожесточённые споры по поводу её интерпретации: Что в действительности описывает волновая  $\Psi$ -функция? То ли объективную неопределённость в

движении электрона (или другой частицы), то ли она отражает лишь *наше незнание* истинной траектории движения электрона?

В результате возникли две различные точки зрения на волновую функцию.

1) *Статистическая интерпретация*. В каждый момент времени электрон (или другая частица) находится в определённом месте пространства. Волновая же функция описывает только возможную вероятность его нахождения в том или ином месте и не даёт знания о реальном местоположении электрона. И в этом смысле квантовая механика не полна.

2) *Копенгагенская интерпретация*. В каждый момент времени электрон не имеет определённого местоположения. Он *действительно* находится с различной плотностью вероятности (а именно,  $|\Psi|^2$ ) в разных точках некоторой области. То есть волновая функция даёт полное описание движения даже одного электрона.

Принципиальное различие этих интерпретаций было сформулировано Эйнштейном на пятом Сольвеевском конгрессе. Уже тогда он высказывал возражения против второй точки зрения [2; с.528-530].

С точки зрения статистической интерпретации движение электрона не отличается принципиально от движения, скажем камня. Просто квантовая механика ещё не достаточно развита (не полна), чтобы рассчитать его движение. Поэтому квантовая механика применима лишь как статистическое описание движения большого количества электронов. А неопределённость местоположения электрона (а значит и его волновые свойства) есть просто результат *нашего незнания* его истинного местоположения. Например, виртуальное облако распределения плотности вероятности местонахождения электрона (рис.9) в действительности не существует.

Такая точка зрения проста и наглядна, так как она основана на идеях классической физики. Но с этой точки зрения совершенно не объяснимо, почему электрон в атоме не падает на ядро. Неужели наше незнание местонахождения электрона в атоме удерживает его от падения? А как быть с

экспериментальным фактом дифракции электронов? И что такое фотон: это частица или волна?

С точки же зрения копенгагенской интерпретации перечисленные выше вопросы легко объяснимы. Но существуют другие вопросы, на которые нет ответа в рамках этой интерпретации. Напомним ещё раз, что с точки зрения копенгагенской интерпретации волновая  $\Psi$ -функция *полностью и однозначно* описывает реальное движение электрона. А это в свою очередь означает, что неделимый электрон может находиться одновременно в разных точках пространства. Это также означает, что неделимый электрон может двигаться с различными скоростями одновременно. А ведь в системе отсчёта, которая движется со скоростью, равной средней скорости движения электрона, электрон уже будет двигаться одновременно во все стороны. Можно представить себе замешательство физиков (возможно, переходящее в бурное негодование), когда им была предложена такая теория.

Теперь настало самое время напомнить о том, что физика – это наука экспериментальная, и наше непонимание какого-либо физического явления не может считаться достаточным основанием для отрицания этого явления. И для того чтобы ответить на вопрос об истинности той или иной интерпретации в данном случае, необходимо провести следующий эксперимент.

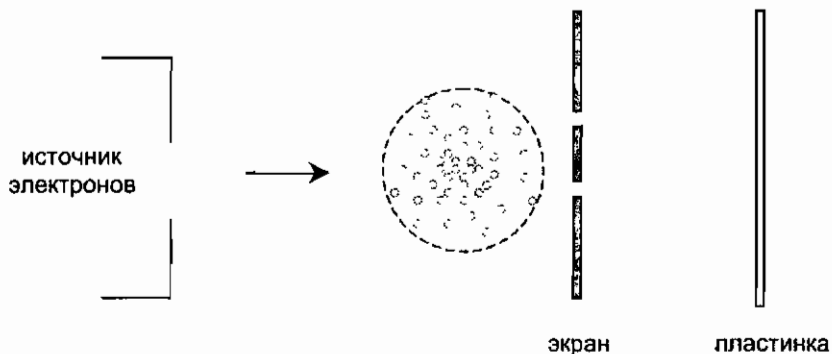
Перед движущимся облаком виртуальных электронов нужно поставить экран с двумя отверстиями, а за экраном поставить пластинку, поглощающую электроны (смотри рис. 11).

Если верна статистическая интерпретация, то никакого облака виртуальных электронов в действительности не существует. А существует только один электрон, который находится в определённом месте этого облака (нам не известном) и который пройдёт только через одно отверстие на экране, после чего попадёт на пластинку.

Проводя такой опыт многократно (при этом каждый новый электрон, вылетающий из источника, будет с равной вероятностью проходить либо через первое отверстие, либо через

второе), мы получим на пластинке некоторое случайное распределение попавших на неё электронов.

А теперь посмотрим, какой следует ожидать результат данного эксперимента в том случае, если верна копенгагенская интерпретация. В этом случае каждый электрон, вылетающий из источника, будет подходить к экрану в виде реально существующего виртуального облака электронов. И, находясь одновременно во всех точках данного облака, каждый электрон будет одновременно проходить через оба отверстия. Таким образом, какая-то часть виртуального облака будет проходить через первое отверстие, и какая-то часть – через второе. (Пока оставим в стороне вопрос о том, какой механизм позволит неделимому электрону пройти одновременно через два отверстия, такой механизм будет предложен в 6-й главе).



**Рис. 11.** Из источника по одному вылетают электроны и в виде виртуального облака проходят через два отверстия на экране. После чего попадают на пластинку – детектор. Механизм прохождения облаком двух отверстий зависит от истинности одной из двух интерпретаций квантовой механики. Если верна статистическая интерпретация, то каждый электрон будет проходить только через одно отверстие, в результате чего на пластинке будет некоторое случайное распределение попавших на неё электронов. Но если верна копенгагенская интерпретация, то каждый электрон в виде виртуального облака будет проходить сразу через оба отверстия. И в результате этого на пластинке может появиться интерференционная картина.

И при определённых условиях проведения эксперимента может произойти интерференция между тем, что прошло через первое отверстие и тем, что прошло через второе. Повторяя данный опыт многократно, можно будет получить на пластинке интерференционную картину. Интерференционную картину ни с чем не спутаешь, так как это очень специфичная картина, в которой минимумы и максимумы резко сменяют друг друга.

Итак, чтобы выяснить, какая из двух интерпретаций истинна, необходимо провести данный эксперимент. Описанию результатов этого эксперимента посвящён следующий параграф.

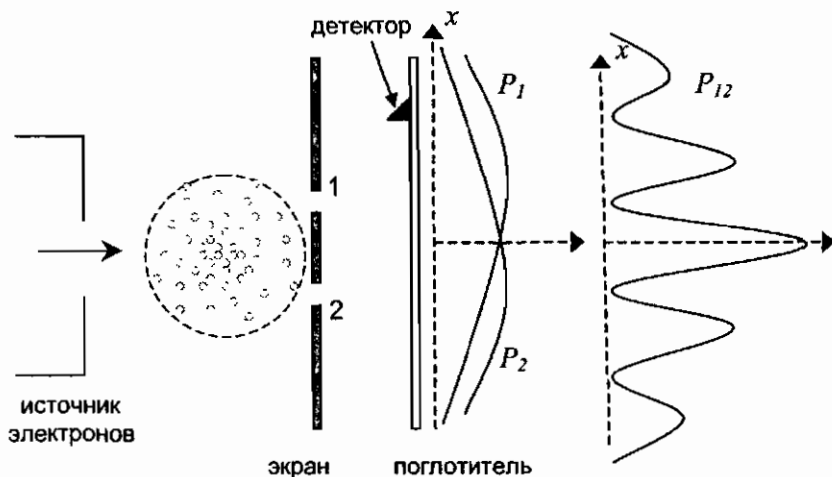
## § 5.4. Интерференция электронов

Сейчас мы рассмотрим упомянутый в предыдущем параграфе эксперимент, в котором наиболее ярко проявляется отличие физики микромира от физики макромира. И который позволит выяснить, какая из двух интерпретаций квантовой механики является истинной. Это, уже ставший классическим, эксперимент, в котором электрон проходит через два отверстия (смотри рис. 12).

Из источника в заданном направлении *по одному* вылетают электроны. В виде виртуального облака они пролетают через два близкорасположенных на экране отверстия. За экраном находится детектор электронов. В эксперименте определяется вероятность  $P_1$  попадания электрона на детектор при его прохождении через первое отверстие (второе отверстие при этом закрыто). Для этого из источника испускается некоторое количество электронов. Число зарегистрированных на детекторе электронов делится на общее число вылетевших электронов (это и есть  $P_1$ ). Аналогично определяется вероятность  $P_2$  попадания электрона на детектор при его прохождении через второе отверстие (первое отверстие при этом закрыто). Затем определяется вероятность  $P_{12}$  попадания электрона на детектор, когда открыты оба отверстия. Местоположение детектора можно изменять и вновь определять  $P_1, P_2, P_{12}$ .

Как видно из рисунка, кривая  $P_{12}$  явно не совпадает с суммой  $P_1 + P_2$ . Это означает, что происходит интерференция электрона с самим собой.

С одной стороны, электрон является неделимой частицей. Но с другой стороны, интерференция возможна только в том случае, когда электрон проходит сразу через два отверстия. Если бы каждый электрон проходил только через одно отверстие, то всегда выполнялось бы равенство  $P_{12} = P_1 + P_2$ .



**Рис. 12.** Источник электронов состоит из вольфрамовой проволоочки, нагреваемой током и помещённой в металлическую коробку с отверстием. Если на проволоочку подано отрицательное напряжение, а на коробку – положительное, то электроны, испущенные проволоочкой, будут разгоняться стенками коробки, и некоторые из них проскочат сквозь отверстие. Перед источником стоит металлическая пластинка с двумя отверстиями – экран. За ней стоит другая пластинка – поглотитель. По ней может двигаться детектор – электронный умножитель, к которому присоединён динамик. При попадании электрона в детектор из динамика доносится "щелчок" [8;с.207].

Кроме того, есть такие точки на поглотителе, соответствующие минимумам кривой  $P_{12}$ , в которые попадает очень мало электронов, когда открыты оба отверстия. А когда одно отверстие закрыто, то их попадает гораздо больше. Получается, что, открыв второе отверстие, вы тем самым уменьшаете число электронов, проходящих через первое. Как это можно объяснить?

А вот середина кривой  $P_{12}$  значительно превышает сумму  $P_1 + P_2$ . Здесь, открыв второе отверстие, вы тем самым увеличиваете число электронов, проходящих через первое.

Зависимость, связывающая кривую  $P_{12}$  с кривыми  $P_1$  и  $P_2$ , очень проста. Пусть  $\Psi_1$  – это амплитуда вероятности того, что электрон пройдёт сквозь отверстие 1 и попадёт в точку  $x$  на поглотителе. А  $\Psi_2$  – амплитуда вероятности того, что электрон пройдёт сквозь отверстие 2 и также попадёт в точку  $x$ . Поэтому  $P_1 = |\Psi_1|^2$ , а  $P_2 = |\Psi_2|^2$ . Амплитуда же вероятности того, что электрон пройдёт через оба отверстия и попадёт в точку  $x$  равна  $\Psi_{12} = \Psi_1 + \Psi_2$ , и поэтому  $P_{12} = |\Psi_1 + \Psi_2|^2 \neq P_1 + P_2$ .

Если же мы всё-таки попытаемся определить, через какое именно отверстие прошёл электрон (например, при помощи источника высокоэнергетических фотонов, расположенного сразу за экраном), то обнаружим, что электрон проходит только через одно отверстие. При этом интерференция не наблюдается.

Приведённый эксперимент в деталях описал Ричард Фейнман. Вот его комментарий к нему: «Всё это выглядит весьма таинственно. И тем таинственней, чем больше об этом думаешь» [8;с.210]. И далее: «Вот как мы обязаны рассуждать, чтобы не делать ошибочных предсказаний. Если вы следите за отверстиями, а точнее, если у вас есть прибор, способный узнавать, сквозь какое отверстие из двух прошёл электрон, то вы можете говорить, что он прошёл сквозь отверстие 1 (или 2). Но если вы не пытались узнать, где прошёл электрон, если в опыте не было ничего возмущающего электроны, то вы не смеете думать, что электрон прошёл либо сквозь отверстие 1, либо сквозь отверстие 2. Если вы всё же начнёте так думать и затем



делать различные выводы, то, несомненно, натворите ошибок в анализе» [8;с.215,216].

Таким образом, данный эксперимент показывает, что электрон действительно существует в виде виртуального облака, и, проходя через экран с двумя отверстиями, он взаимодействует сам с собой. Такого взаимодействия не было бы, если бы виртуальное облако (или волновая  $\Psi$ -функция, описывающая его движение) лишь отражало наше незнание истинного местоположения электрона. Следовательно, статистическая интерпретация не верна.

На всякий случай можно отметить, что в защиту статистической интерпретации высказывалось следующее предположение. Электрон проходит всегда только через одно отверстие, но электромагнитное поле, создаваемое электроном, каким-то образом отражается от второго отверстия и влияет на движение электрона, и в результате происходит интерференция. Это интересное предположение, но оно всё же не верно. Дело в том, что размеры электрона, по крайней мере, меньше чем  $10^{-18}$  м [18,т.5;с.545]. А расстояние между отверстиями, по крайней мере, больше чем размер атома, то есть больше, чем  $10^{-10}$  м. И если ещё учесть, что электромагнитное поле убывает пропорционально квадрату расстояния, то становится ясно, насколько незначительно влияние другого отверстия в том случае, если бы электрон проходил только через одно отверстие.

## § 5.5. Спор Эйнштейна и Бора

Гипотеза о волновой природе электрона, выдвинутая Луи де Бройлем, была воспринята целым рядом физиков отрицательно. «Отрицательно к ней отнёсся и Шрёдингер. Когда Дебай попросил его рассказать молодёжи о работах де Бройля, Шрёдингер сначала отказался» [22;с.203].

В то время как Альберт Эйнштейн сразу поддержал эту гипотезу. А уже через два года она была экспериментально подтверждена в опытах по дифракции электронов. Однако Эйнштейн не согласился с копенгагенской интерпретацией

квантовой механики, считая новую теорию неполной. А защищал квантовую механику в то время Нильс Бор. В результате возник интересный исторический спор двух великих учёных, затрагивающий наиболее тонкие вопросы физики микромира. Смотри, например, статью Бора «Дискуссии с Эйнштейном по проблемам теории познания в атомной физике» [3; с.399-433].

Кульминация спора наступила в 1935 году, когда Эйнштейн (совместно с Розеном и Подольским) предложил следующий мысленный эксперимент [2; с.604-611]. Допустим, что некоторая система, состоящая из двух частей  $A$  и  $B$  и описываемая волновой функцией  $\Psi_{AB}$ , самопроизвольно распадается. Например, два протона, находящиеся во взаимодействии друг с другом, разлетаются в разные стороны. Через некоторое время расстояние между ними станет настолько большим, что их взаимодействием можно будет пренебречь.

Квантовая механика не может точно предсказать, в каких направлениях разлетятся протоны. Она позволяет только рассчитать вероятность того или иного направления. Однако если нам удастся обнаружить один протон, движущимся, например, в северном направлении, то отсюда следует, на основании закона сохранения импульса, что второй протон движется в южном направлении. Исходя из этого, можно сделать два различных предположения.

Первое предположение, сделанное с точки зрения статистической интерпретации и основанное на “здравом смысле”. *Второй протон сразу же после взаимодействия двигался в южном направлении, и мы узнали об этом, когда обнаружили первый протон.*

Второе предположение, сделанное с точки зрения копенгагенской интерпретации и основанное на том, что  $\Psi$ -функция даёт полное описание движения. *Измерение состояния первого протона мгновенно изменило  $\Psi_{AB}$ -функцию, а значит, и состояние второго протона. То есть второй протон стал двигаться в южном направлении только после того, как мы “поймали” первый.*

Таким образом, квантовая механика предсказывает возможность *мгновенного действия на расстоянии*. Эта парадоксальная черта квантовой механики (ещё более непонятная, чем интерференция электронов) получила название “нелокальность”. Механизм, наглядно объясняющий нелокальность квантовой механики, будет предложен в 6-й главе.

Эйнштейн отрицал возможность мгновенного действия на расстоянии и поэтому отверг второе предположение. Он сделал вывод, что второй протон сразу же после взаимодействия летел в южном направлении. А так как квантовая механика не могла предсказать этого заранее, то, следовательно, она является лишь вероятностным (статистическим) описанием движения и не даёт полного представления о реальности. Говоря другими словами, копенгагенская интерпретация не верна. Вот что он пишет об этом в статье «Вводные замечания об основных понятиях»: «Если бы  $\Psi$ -функция давала полное описание реального состояния, то это бы означало, что измерение, производимое над второй подсистемой, оказывает влияние на реальное состояние первой подсистемы. Это соответствовало бы существованию какой-то непосредственной связи между двумя пространственно разделёнными событиями. Однако этот случай также отвергается интуицией. Таким образом, и в этом случае приходим к выводу, что описание состояния с помощью  $\Psi$ -функции следует считать неполным» [2;с.625].

Нильс Бор не согласился с таким выводом. В парадоксальности квантовой механики он видел отражение парадоксальности, наблюдаемой в микромире. Таким образом, из его точки зрения следовало, что необычность квантовой механики является косвенным подтверждением её истинности и полноты. Он считал, что рассуждения, приводимые Эйнштейном и основанные на понятиях классической физики, не применимы для описания квантовых объектов. Во избежание подобных “парадоксов” Бор предлагал отказаться от наглядного представления квантово-механических процессов. Вот как он возражал Эйнштейну в ответной статье «Можно ли считать, что квантово-механическое описание физической реальности

является полным?»: «Однако такого рода аргументация едва ли пригодна для того, чтобы подорвать надёжность квантово-механического описания, основанного на стройной математической теории, которая автоматически охватывает все случаи измерения, подобные указанному. Кажущееся противоречие на самом деле вскрывает только существенную непригодность обычной точки зрения натуральной философии для описания физических явлений того типа, с которыми мы имеем дело в квантовой механике» [3;с.181,182].

Ответ Бора по своей сути является верным, но недостаточно убедительным. Верным потому, что дальнейшее развитие физики, а также изящные эксперименты последних лет подтвердили нелокальный характер и полноту квантовой механики. А недостаточно убедительным потому, что этот ответ показался неубедительным и непонятным даже Эйнштейну. Эрнст Резерфорд, у которого одно время учился Бор, говорил, что если теория представляет собой хоть какую-либо ценность, то её можно объяснить даже буфетчице [29;с.110]. Бора можно упрекнуть в том, что он не смог ясно и просто объяснить квантовую механику хотя бы Эйнштейну.

Даже в наше время некоторые учёные, также как и Эйнштейн, придерживаются статистической интерпретации квантовой механики и отвергают копенгагенскую. Они предполагают, что частица движется по определённой траектории, но её движение зависит от каких-то пока неизвестных скрытых параметров. Они надеются ввести в квантовую механику эти дополнительные параметры, чтобы можно было однозначно предсказать движение частицы. С этой точки зрения объективной неопределённости и случайности не существует. Просто нам пока неизвестны значения скрытых параметров.

Предполагается, что новая теория будет иметь локальный характер, в отличие от квантовой механики. Как уже говорилось, квантовая механика считается нелокальной теорией, потому что в ней измерения, сделанные над одной частью системы, могут мгновенно изменить состояние другой части системы.

На первый взгляд может показаться странным, что есть ещё учёные, которые придерживаются статистической интерпретации и отвергают копенгагенскую. Ведь эксперименты как раз подтверждают предсказания копенгагенской интерпретации и показывают полную несостоятельность статистической. Такому предпочтению можно дать следующее объяснение. Для многих людей, по-видимому, психологически легче придерживаться пусть неверной, но зато понятной теории (в надежде, что в будущем, возможно, удастся её усовершенствовать), чем принять верную, но непонятную.

В 1964 году Дж. Белл показал, что предсказания возможных локальных теорий со скрытыми параметрами будут существенно отличаться от предсказаний квантовой механики. И в принципе можно экспериментально определить, какая из теорий верна – квантовая механика или локальные теории со скрытыми параметрами.

Следует отметить, что подобный эксперимент *реально* (!) провели в 1982 году А. Аспект, Ж. Далибар и Ж. Роже из Оптического института Парижского Университета. По иронии судьбы авторы – сторонники локальных теорий со скрытыми параметрами (альтернативных квантовой механике). Однако, вопреки замыслу авторов, эксперимент подтвердил «одно из самых странных свойств квантового мира – нелокальность» [30;с.26]. «Полученные результаты отчётливее, чем когда-либо показывают, что мы живём в странном “квантовом мире”, не поддающемся интерпретации на основе очевидного здравого смысла. Вот несколько новых необычных выводов, справедливость которых мы вынуждены признать. Во-первых, два объекта, разделённые многометровым расстоянием и никак между собой не связанные, тем не менее “чувствуют” присутствие друг друга. Их поведение поразительным образом скоррелировано, так что измерения, выполненные над одним из них, мгновенно влияют на результаты измерений, выполняемых над другим. Этот вывод невозможно объяснить с точки зрения классической науки, но он полностью согласуется с квантовой механикой. Во-вторых, фотон – квант электромагнитного

излучения – может вести себя и как частица, и как волна. В таком неопределённом состоянии он существует до тех пор, пока над ним не проведут какого-то физического измерения» [30;с.22]. Смотри также [53].

В настоящее время нелокальный характер квантовых процессов – это многократно проверенный экспериментальный факт. Например, группой Гизина (N. Gisin) в Женеве был проведён корреляционный опыт [54], в котором квантовые объекты, описываемые общей волновой  $\Psi$ -функцией, были разделены расстоянием в 10 км! И тем не менее, измерения, произведённые над одним квантовым объектом, мгновенно изменяли состояние другого квантового объекта. В июньском номере журнала «Успехи физических наук» за 2000 год была напечатана обзорная статья на эту тему: «Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения и новые формулировки старых вопросов». Вот выдержка из неё: «измерение, проведённое над одной из частиц, определяет результат измерения над второй частицей, которое проводится в тот же момент времени в другой точке пространства. Два события (измерение первой частицы и измерение второй частицы) могут быть разделены пространственно-подобным интервалом и, тем не менее, одно из них предопределяет второе» [52].

## § 5.6. Виртуальные фотоны

Сейчас мы рассмотрим эксперимент, раскрывающий в полной мере всю необычность поведения квантовых объектов. Описание подобных (а также более экзотических) экспериментов, как реальных, так и мысленных, приводится в статье «Квантовая философия», опубликованной в журнале «В мире науки» за 1992 год в №9,10. Данные опыты были проведены с фотонами, но «дело в том, что электроны ведут себя в точности подобно свету. Квантовое поведение всех атомных объектов (электронов, протонов, нейтронов, фотонов и т.д.) одинаково: всех их можно назвать “частицами-волнами” (годится, впрочем, и любое другое название)» [8;с.202].

Вот описание эксперимента (смотри рис. 13). Луч лазера направляется на светоделитель – зеркало, покрытое слоем серебра такой толщины, чтобы половина падающих на него фотонов отражалась, а другая половина проходила сквозь зеркало. После расщепления на светоделителе оба луча с помощью системы зеркал направляются к детектору и соединяются на нём.

В данном эксперименте для каждого фотона существует всего три возможности. Во-первых, отразиться от светоделителя и попасть через систему зеркал на детектор. Во-вторых, пройти светоделитель насквозь и также попасть на детектор, но пройдя уже другой путь. И, наконец, в-третьих, проявив свою волновую природу, расщепиться на светоделителе на две волны и попасть на детектор сразу по обоим путям.

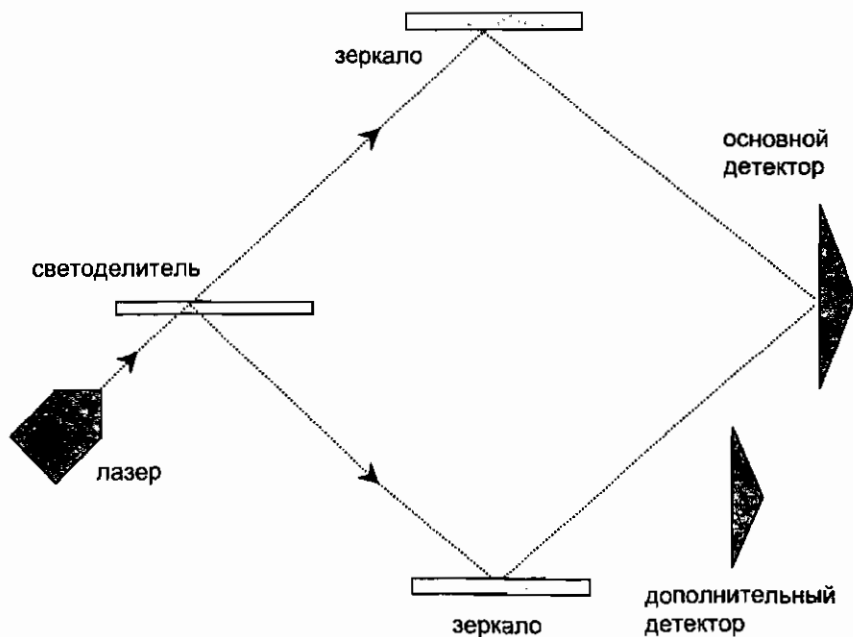


Рис. 13.

Если ничто не мешало идти фотону по обоим путям, то он вёл себя как волна и расщеплялся на светоделителе на две волны, которые интерферировали друг с другом на детекторе. Но если один путь был перекрыт (его перекрывали дополнительным детектором), то каждый фотон вёл себя как частица и летел только по одному пути, попадая либо на основной, либо на дополнительный детектор.

С одной стороны, каждый фотон попадал на детектор, принося определённую энергию (всегда одну и ту же), то есть вёл себя как частица. Но с другой стороны, если оба пути были открыты, то фотон, расщепившись на две волны, шёл сразу по обоим путям (однозначно такой вывод можно сделать, наблюдая интерференцию на детекторе), то есть вёл себя как волна.

Поэтому экспериментаторы решили “обхитрить” фотон, время от времени перекрывая один из путей *уже после того, как фотон прошёл через светоделитель, но прежде, чем он достиг детектора*. Тем не менее, фотон снова вёл себя как частица в том случае, если один путь был перекрыт, и как волна (шёл сразу по обоим путям), если оба пути были открыты.

А что если сделать интерферометр размером с Солнечную систему (в статье предлагается ещё более грандиозный эксперимент)? Скажем, лазер и светоделитель установить на Юпитере, а детектор – на Земле. При этом сделать так, чтобы один луч шёл на Землю через систему зеркал на Марсе, а другой – через систему зеркал на Венере.

Предположим теперь, что пучок фотонов уже прошёл через светоделитель и летит к Земле, а экспериментатор всё ещё думает: наблюдать ли интерференцию на детекторе или перекрыть один из путей дополнительным детектором? Но ведь каждый фотон находится уже достаточно далеко от светоделителя. Он либо как частица уже летит только по одному пути, либо как волна – сразу по двум. А из уравнений квантовой механики следует, что если экспериментатор оставит оба пути открытыми, то окажется, что каждый фотон пролетел сразу по двум путям, и на детекторе произойдёт интерференция. А если же экспериментатор перекроет один путь, то окажется, что



каждый фотон пролетел, подобно частице, только по одному пути. Получается, что действия экспериментатора, выполненные “сейчас”, способны повлиять на “выбор” фотона, который уже произошёл в достаточно далёком прошлом.

Вот что написано в статье о таком странном поведении квантовых объектов: «Вплоть до настоящего времени эксперименты подтверждают худшие опасения Эйнштейна. Фотоны, нейтроны, и даже целые атомы иногда ведут себя как волны, а иногда – как частицы, однако в действительности они не имеют никакой определённой формы до тех пор, пока их не подвергают измерениям... Измерение одного квантового объекта может мгновенно повлиять на другой, расположенный далеко от него. Такое странное поведение может встречаться не только в микромире, но и у достаточно больших объектов, видимых невооружённым глазом. Эти открытия стимулировали возрождение интереса к определённой трактовке (интерпретации) квантовой механики, где делаются попытки ввести её в разумные рамки. Но существующие в настоящее время интерпретации выглядят какими угодно, только не разумными. В некоторых из них предлагается концепция “множественности миров”, в других требуется поверить в логику, допускающую, чтобы два противоположных по смыслу утверждения были истинны» [31;с.72].

Следует отметить, что Альберт Эйнштейн в дискуссии с Нильсом Бором уже приводил мысленный эксперимент с фотоном, чтобы показать парадоксальность квантовой механики: «Пусть на пути фотона помещено полупрозрачное зеркало, предоставляющее ему для направления его дальнейшего распространения две возможности. Тогда фотон может быть зарегистрирован на одной и только на одной из двух фотографических пластинок, находящихся на большом расстоянии друг от друга на упомянутых направлениях; если же мы заменим пластинки зеркалами, то мы сможем наблюдать явления, показывающие, что обе отражённые волны интерферируют. При всякой попытке наглядно представить себе поведение фотона мы, стало быть, встретились бы со следующим затруднением: с одной стороны, мы должны были бы сказать, что

фотон всегда выбирает *один* из двух путей, с другой же стороны, он ведёт себя так, как если бы он пошёл по *обоим* путям сразу» [3;с.417]. Чтобы избежать подобных противоречий, Бор отрицал саму возможность наглядного представления квантовых процессов: «Отказ от наглядного представления атомных явлений обусловлен невозможностью подразделить их и тем самым проследить их более детально» [3;с.417].

Нужно отметить, что из уравнений квантовой механики действительно вытекает “шизофренический” (термин из статьи) характер квантовых процессов. И в этом смысле квантовая механика является вполне законченной теорией, в полной мере описывающей всю необычность поведения квантовых объектов. Тем не менее, вопрос о физическом смысле квантовых явлений и о причинах странного поведения квантовых объектов до сих пор остаётся открытым. Остаётся также открытым вопрос о том, что *физически* представляет собой квантовый объект до тех пор, пока над ним не произведено измерение (наблюдение).

## § 5.7. Квантовая механика и здравый смысл

Чтобы лучше разобраться в особенностях квантовой механики, следует выяснить, чем именно квантовая механика отличается от классической и что в ней наиболее противоречит здравому смыслу.

### **1. Закономерность и случайность: вероятностный характер квантово-механических законов.**

Существенной особенностью квантовой механики является вероятностный характер процессов, происходящих в микромире. Полностью зная начальное состояние какой-либо системы, мы не сможем точно предсказать её дальнейшее поведение. И дело здесь не в том, что наши знания о данной системе неполны. *Вероятностный характер является объективной чертой квантовых процессов.*

А с точки зрения классической механики в мире царит жёсткая причинно-следственная связь событий. Значения координат и скоростей полностью определяют состояние

классической системы и позволяют, в принципе, предсказать дальнейшее её движение. То, что происходило в прошлом, однозначно определило настоящее. А настоящее, в свою очередь, полностью определяет будущее. Такой взгляд на природу наиболее ярко выразил Лаплас: «Дайте мне начальные условия, и я рассчитаю всю Вселенную».

Получается, например, что распределение частиц в газопылевой туманности (из которой образовалась Солнечная система) полностью предопределило всю дальнейшую историю развития Солнечной системы, в том числе и историю развития человечества. То, что происходит сейчас в мире, оказывается, было однозначно предопределено в далёком прошлом. Трудно придумать что-либо более абсурдное и противоречащее здравому смыслу.

Поэтому в этом вопросе (случайность и закономерность) как раз классическая механика и противоречит здравому смыслу. И наоборот, квантовая механика является более полной теорией, описывающей наш мир, так как она отражает не только закономерность, но и случайность, которая также наблюдается в физических процессах.

## **2. Определённость и неопределённость.**

В отличие от классической механики в квантовой механике отсутствует такое понятие, как траектория движения частицы. *В данный момент времени квантовый объект (например, электрон) находится с различной плотностью вероятности в разных точках некоторой области.*

В классической механике предполагается, что центр масс некоторого тела в данный момент времени находится в определённой точке пространства. И движение центра масс происходит по непрерывной линии – траектории. Однако математическое понятие точки не имеет непосредственного физического смысла. Поэтому предположение о существовании траектории (непрерывной математической линии) движения не следует из экспериментальных данных, а является лишь удобной математической абстракцией. Подробно эту тему обсуждает

Макс Борн в статье «Непрерывность, детерминизм, реальность» [32;с.162].

### **3. Корпускулярно-волновой дуализм.**

В основе квантовой механики лежит предположение о двойственной корпускулярно-волновой природе вещества и поля. *Электромагнитное поле излучается и поглощается порциями (фотонами)*, то есть проявляет свойства частиц. С другой стороны, частицы обладают волновыми свойствами. *Скажем, электрон (или фотон) является неделимой частицей, но он может пройти одновременно через два отверстия.*

Подробно эта тема обсуждается, например, в «Берклевском курсе физики», том 4, Квантовая физика, пункты: «Можно ли расщепить фотон?» и «Можно ли расщепить волны материи?» [13;с.168,с.203].

Корпускулярно-волновой дуализм является наиболее парадоксальной чертой квантовой механики. Однако эта черта лишь отражает парадоксальное поведение квантовых объектов.

### **4. Нелокальность квантовой механики.**

Из уравнений квантовой механики следует, что измерения, проделанные над одной частью системы (описываемой общей волновой функцией), *мгновенно влияют* на результаты измерений, проделанных над другой частью. Вот, например, что написано об этом в Физической энциклопедии [18,т.4;с.550]: «поставленные в ряде лабораторий мира эксперименты подтвердили предсказания квантовой механики о существовании более сильных корреляций между частицами, чем предсказывают любые локальные теории со скрытыми параметрами. Согласно этим теориям, результаты эксперимента, проведённого над одной из частиц, определяются только этим экспериментом и не зависят от результатов эксперимента, который может проводиться над другой частицей, не связанной с первой силовыми взаимодействиями».

Может показаться, что мгновенное действие на расстоянии противоречит теории относительности. Однако из-за вероятностного характера волновой функции противоречия здесь нет. Подробнее этот вопрос будет рассмотрен в § 6.7. Тем не менее,

остаётся неясным, каким образом *физически* осуществляется механизм “дальнодействия”.

В целом же следует отметить, что отсутствие наглядного описания квантовых процессов делает квантовую механику чрезвычайно трудной для понимания. Ранее уже приводилась цитата Ричарда Фейнмана по поводу необычности квантовой механики: «Но мне кажется, я смело могу сказать, что квантовой механики никто не понимает» [11;с.117]. Поэтому хотелось бы дополнить копенгагенскую интерпретацию понятной и наглядной иллюстрацией. А также предложить модель движения квантового объекта, объясняющую, с одной стороны, *как неделимый электрон может пройти одновременно через два отверстия*, а с другой стороны, *как физически осуществляется дальнодействие*.

Таким образом, наша задача состоит в том, чтобы ответить на два вопроса. Во-первых, что является причиной необычного поведения квантовых объектов? И, во-вторых, *как движется и что собой представляет* квантовый объект, когда над ним не производится измерение (наблюдение)? Этому будет посвящена следующая глава.