

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова

М. В. Мартынов, Д. А. Румянцев

# Физические концепции естествознания

Учебное пособие

Ярославль  
ЯрГУ  
2016

УДК 502:53(075)  
ББК Б.я73+В3я73  
М 29

*Рекомендовано  
Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного издания. План 2016 года*

Рецензенты:

доктор физ.-мат. наук, профессор А. В. Проказников;  
кафедра физики Ярославского государственного технического университета

**Мартынов Михаил Викторович.**

**М29** Физические концепции естествознания: учебное пособие /  
М. В. Мартынов, Д. А. Румянцев; Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Де-  
мидова. — Ярославль : ЯрГУ, 2016. — 110 с.

ISBN 978-5-8397-1077-1

Данный курс предназначен для подготовки бакалавров и специалистов как по гуманитарным, так и по техническим направлениям. Его основной задачей является расширение естественно-научного способа мышления студентов. В пособии рассмотрены классические и современные представления о пространстве и времени, современная картина элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, роль симметрии в физике, основы квантовой теории и основы космологии.

УДК 502:53(075)  
ББК Б.я73+В3я73

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-02-00233-А).*

ISBN 978-5-8397-1077-1

© ЯрГУ, 2016

# Оглавление

<b>Предисловие</b>	<b>4</b>
<b>Введение</b>	<b>5</b>
<b>1. Эволюция физики от классической механики Ньютона до теории относительности Эйнштейна</b>	<b>17</b>
1.1. Основы классической механики . . . . .	17
1.2. Специальная теория относительности . . . . .	23
1.3. Общая теория относительности . . . . .	30
<b>2. Элементарные частицы и фундаментальные взаимодействия</b>	<b>39</b>
2.1. Элементарные частицы и их классификация . . . . .	39
2.2. Фундаментальные взаимодействия . . . . .	46
<b>3. Симметрия в фундаментальной физике</b>	<b>53</b>
3.1. Симметрии и законы сохранения . . . . .	53
3.2. Стандартная модель взаимодействий элементарных частиц . .	58
<b>4. Основы квантовой теории</b>	<b>61</b>
4.1. Проблемы классической физики . . . . .	61
4.2. Принципы квантовой механики . . . . .	69
<b>5. Основы космологии</b>	<b>77</b>
5.1. История космологических представлений . . . . .	78
5.2. Наблюдаемые факты о Вселенной . . . . .	84
5.3. Общие принципы в построении космологических моделей . .	94
5.4. Большой Взрыв. Инфляция. Нуклеосинтез . . . . .	100
5.5. Простейшая космологическая модель и судьба Вселенной . .	103
<b>Литература</b>	<b>108</b>

# Предисловие

Воспитание гармонично развитой личности в современном быстроме­няющемся мире является одной из основных задач высшего образования. В связи с этим возникают определенные трудности в понимании специ­фики гуманитарного и естественнонаучного компонентов культуры. Для преодоления этих трудностей на большинстве гуманитарных направлений введено преподавание дисциплины «Концепции современного естествозна­ния». Данная дисциплина охватывает обширные области естественных наук и основывается на знаниях, полученных в средней школе и на современных представлениях в области физики, химии, биологии, формируемых в про­цессе изучения данного курса. Это накладывает определенные требования к содержанию курса и его изложению.

В предлагаемом учебном пособии рассматривается только часть курса, посвященная в первую очередь обзору современного состояния физической науки — от классической механики до космологии. Конечно, ограниченный объем пособия не позволил включить сюда такие разделы, как физика твердого тела, теории великого объединения, современная планетология и ряд других. Вдумчивый читатель самостоятельно сможет прочитать до­полнительный материал исходя из списка литературы, помещенного в конце пособия. Основная наша цель — донести до читателя сложные в матема­тическом плане вопросы наиболее доступным образом. Поэтому материал учебного пособия подчинен простому принципу: меньше сложных количе­ственных рассуждений — больше качественного анализа явлений, простых и образных примеров.

Текст подготовлен на основе лекционного курса, читаемого студентам гуманитарных факультетов Ярославского государственного университета имени П. Г. Демидова. Учебное пособие предназначено для студентов, обу­чающихся по направлениям 45.03.01 «Филология», 030300.62 «Психология» и другим родственным программам, а также может быть использовано в качестве дополнительного материала по курсу «Введение в специальность» направления подготовки 03.03.02 «Физика».

Авторы выражают благодарность профессору кафедры теоретической фи­зики ЯрГУ А. В. Кузнецову и директору фирмы «А–Вижн» И. В. Апалькову за неоценимую помощь в издании данного пособия.

## Введение

«Человек есть мера всех вещей, существующих, что они существуют, несуществующих, что они не существуют» — этими словами древнегреческий философ Протагор описывал субъективность любого знания. Поскольку каждый человек есть мера всех вещей, а люди отличаются друг от друга, то не существует объективной истины, а есть лишь субъективное мнение. Можно понять эту мысль и по-другому: человек является универсальным измерителем, и все природные явления получают объяснение, преломляясь в человеческом разуме. И все-таки только истинное, объективное знание имеет ценность для практической деятельности человечества.

Стремясь к объективному знанию о действительности, человечество создало Науку — жемчужину культуры и главное достижение разума. Из всех наук особое место заняли науки, изучающие природу. Родившись в XVII веке как естествознание и натурфилософия, развиваясь, эти науки разделились на множество ветвей — современные Естественные науки. Из естествознания возникли *фундаментальные науки* — физика, химия, биология, астрономия, география, геология. На стыках этих наук появились геофизика, астрофизика, биохимия, физическая химия, химическая физика, геохимия, метеорология, климатология, почвоведение и многие-многие другие. Наука углубляется и специализируется, каждая наука выделяет свой особый объект и вырабатывает свои особые практики и методы познания.

Сейчас мы знаем множество объектов, совершенно не соразмерных человеку, тем удивительнее, что мы можем описывать, изучать и понимать их. Пытаясь расположить природные объекты в некотором порядке, мы воспользуемся идеей Шелдона Глэшоу<sup>1</sup>: основой нашего порядка будет пространственный размер характерного объекта.

Наш обычный мир больших, но не гигантских вещей принято называть *макромиром*. Мир планетарных, астрономических объектов можно назвать *мегамиром*, а мир бактерий, атомных и субатомных частиц называют *микромиром*. Все объекты можно по размеру расположить на условной «линейке» — рис. В.1.

---

<sup>1</sup>Шелдон Ли Глэшоу (р. 1932) — нобелевский лауреат, один из создателей современной физики элементарных частиц.

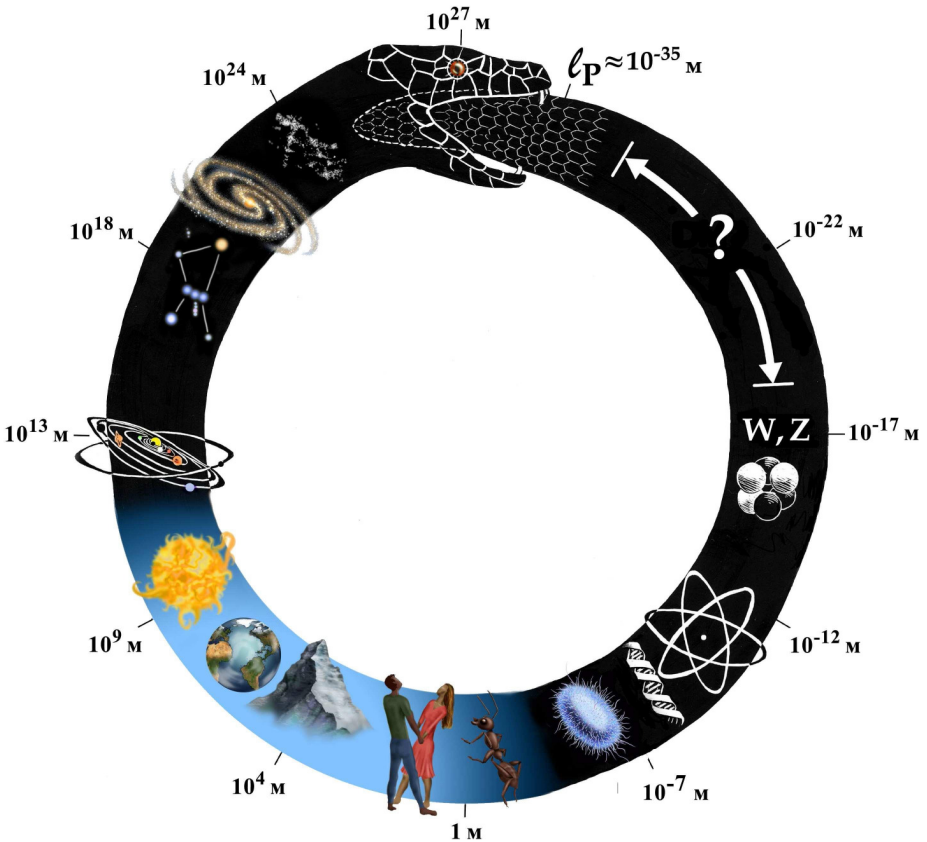


Рис. В.1. Космологический Уроборос

## Макромир

К области размеров условно от  $10^{-3}$  м до 1000 м относится и человек (рост в среднем 1,7 м), и огромное множество различных объектов — весь Макромир. Рассмотрим подробнее области далекие от повседневного опыта: Микромир и Мегамир.

## Микромир

**Клетка** — характерный размер  $10^{-5}$  м.

Первым важным объектом микромира можно назвать *клетку* — мельчайшую единицу живой материи. Впервые клетки удалось увидеть только после создания световых микроскопов. С того времени и до сих пор *микроскопия* остается одним из важнейших методов исследования клеток (см. рис. В.2).

Существует дифракционный предел — наименьший размер объекта, который можно рассмотреть, освещая его электромагнитным излучением:  $d_{min} \approx \lambda/2$ . В оптическом микроскопе используется видимый свет с длинами волн  $\lambda = 400 - 700$  нм, поэтому минимальный видимый размер составляет около 200 нм<sup>1</sup>.

Нельзя рассмотреть объект, размер которого существенно меньше длины волны света, которым его освещают.

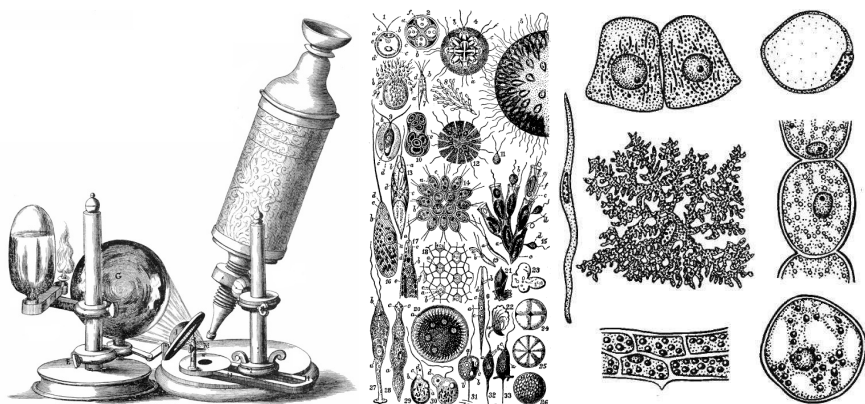


Рис. В.2. Микроскоп Роберта Гука. Простейшие. Клетки

**Молекула ДНК** — характерный размер  $10^{-6}$  м.

Следующим объектом, чрезвычайно важным для понимания жизни и наследственности, является молекула ДНК — Дезоксирибонуклеиновая кислота (рис. В.3). Это *макромолекула*, обеспечивающая хранение, передачу из поколения в поколение и реализацию генетической программы развития и функционирования живых организмов. ДНК содержит информацию о структуре различных видов РНК и белков. Молекула ДНК состоит из огромного числа атомов. Например, в ДНК человека несколько миллиардов атомов.

Для исследования объектов, недоступных оптическому микроскопу, необходимо использовать излучение с меньшими длинами волн. Так появились ультрафиолетовые, рентгеновские и электронные микроскопы. В последних вместо света (электромагнитного излучения) — потока фотонов — используется поток электронов. Длина волны движущегося электрона во много раз короче световой, поэтому и размеры объекта, который удастся рассмотреть в лучах «электронного света», могут быть намного меньше.

<sup>1</sup>Один нанометр равен одной миллиардной метра —  $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ .

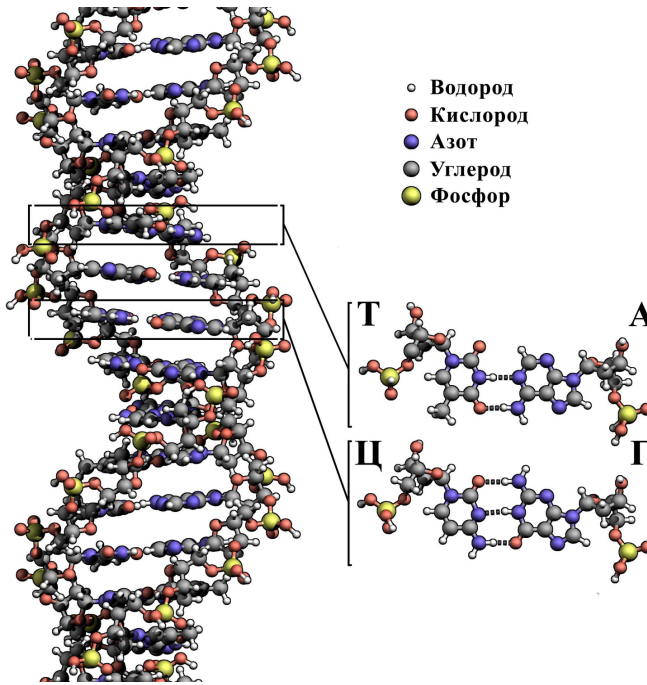


Рис. В.3. Двойная спираль ДНК

Также показаны четыре вида азотистых оснований — аденин (А), гуанин (Г), цитозин (Ц), тимин (Т). Рисунок Ричарда Уилера.

Длина волны зависит от скорости электронов, а следовательно, от ускоряющего напряжения: чем больше ускоряющее напряжение, тем больше скорость электронов и тем меньше длина волны, а значит, выше разрешение.

Чем больше энергия частицы, тем меньше ее длина волны.

Электроны ускоряются электрическим полем, поэтому их энергию удобно измерять в электронвольтах. Так, 1 электронвольт — это энергия, которую получает электрон, пройдя разность потенциалов в 1 Вольт:

$$1 \text{ эВ} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Оказывается, что в фундаментальной физике все энергии и массы очень удобно измерять именно в электронвольтах.

В современных электронных микроскопах энергия электронов составляет от 200 эВ до 400 кэВ. Лучшее разрешение для современного электронного микроскопа — около 0,05 – 0,4 нм.



**Нанообъекты** — характерный размер  $10^{-7} - 10^{-9}$  м.

В последние годы в науке (и технологии) появилась огромная область, изучающая нанообъекты — объекты с размерами порядка 1 – 100 нм. Они крайне разнообразны: наноструктуры углерода (фуллерены — молекулы углерода  $C_{60}$ , нанотрубки, графен и др. — рис. В.4), композитные материалы с нанодобавками, тонкие пленки различных веществ, катализаторы, аэрогели и пенометаллы, «механические» устройства наноразмеров, ферменты, вирусы, белки, современные транзисторы<sup>1</sup> и многие другие.

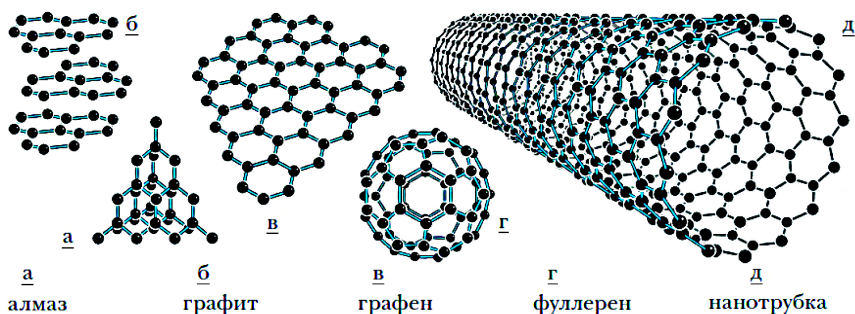


Рис. В.4. Наноструктуры углерода

Все нанообъекты имеют общую характеристику: число атомов в них очень мало по сравнению с макротелами, но все-таки существенно превышает число атомов в простых молекулах. В физике объектов нанодиапазона причудливым образом переплетаются и законы классической физики (законы макромира), и законы квантовой механики. На таких масштабах привычные макроскопические технологии обращения с материей часто неприменимы, а микроскопические явления, пренебрежительно слабые на привычных масштабах, становятся намного значительнее.

Практический аспект — нанотехнология — включает в себя производство устройств и их компонентов, необходимых для создания, обработки и манипуляции атомами, молекулами и наночастицами.

Прорывом в нанофизике стало создание в 1980-х гг. *сканирующего зондового микроскопа*, с помощью которого можно не только увидеть отдельные атомы, но и избирательно воздействовать на них, в частности перемещать атомы по поверхности. Ученым уже удалось создать двумерные наноструктуры на поверхности, используя данный метод.

<sup>1</sup>Типичный размер современных транзисторов 10 – 28 нм. В современных процессорах порядка 2 млрд транзисторов находится на кристалле площадью 1 см<sup>2</sup>.

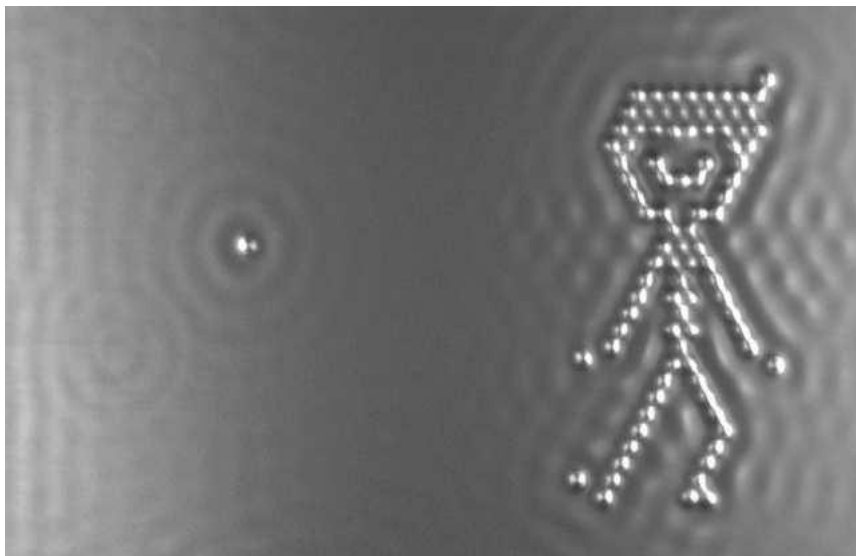


Рис. В.5. Кадр из мультфильма «A Boy and His Atom»

Этот мультфильм создан в 2013 г. учеными из компании IBM с помощью сканирующего туннельного микроскопа, способного манипулировать отдельными молекулами и атомами; мультфильм состоит из 242 изображений, сформированных на медной подложке из молекул CO; изображение увеличено более чем в 100 миллионов раз.

Например, в исследовательском центре компании IBM, последовательно перемещая молекулы оксида углерода на поверхности монокристалла меди, сотрудники смогли создать мультфильм (рис. В.5).

**Молекулы и атомы** — характерный размер  $10^{-10}$  м.

Современные методы позволяют «разглядеть» отдельные молекулы и атомы. Однако гораздо больше информации об их структуре дает исследование химических свойств и *спектроскопия* — изучение спектров излучения и поглощения молекул и атомов (пример спектра — рис. В.6). Оказывается, что все многообразие и химических, и спектральных характеристик атомов и молекул практически полностью определяются свойствами их электронных оболочек.

Так же, как уникальны отпечатки пальцев каждого человека, уникальны спектры каждого химического элемента. С помощью *спектрального анализа* можно с большой точностью определять химический состав любых объектов — от обычных предметов (сплавов металлов, пищевых продуктов и т. п.) до звезд и галактик.

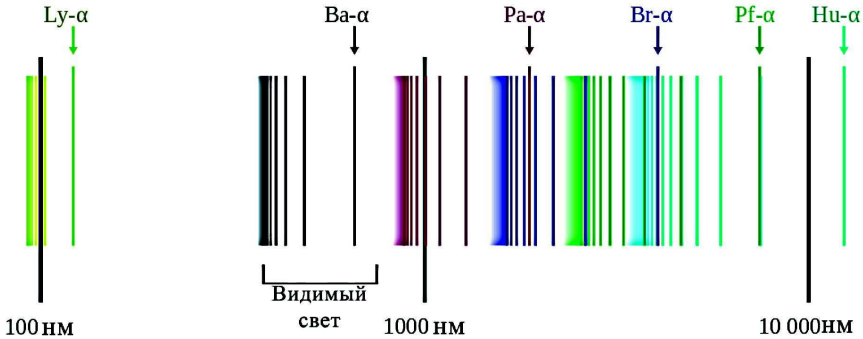


Рис. В.6. Спектральные линии атома водорода

Показаны спектральные серии: Лаймана, Бальмера, Пашена, Брэккета, Пфунда, Хэмпфри.

**Ядро** — характерный размер  $10^{-15}$  м.

Основная масса атома сосредоточена в компактном объекте — атомном ядре. Ядро состоит из протонов и нейтронов. Положительный заряд ядра (число протонов в ядре) определяет химический элемент, к которому относят атом.

Строение и свойства ядер имеют принципиальное значение для понимания радиоактивности, ядерной и в перспективе термоядерной энергетики, для многих разделов астрофизики (термоядерные реакции в звездах, эволюция звезд, нуклеосинтез).

**Масштаб слабых взаимодействий** — характерный размер  $10^{-17}$  м.

На расстояниях, еще меньше ядерных, действуют слабые силы и существуют их переносчики:  $W$ - и  $Z$ -бозоны. Такой малый радиус слабых взаимодействий определяется тем, что частицы-переносчики обладают большой массой. Это и приводит к «слабости» слабого взаимодействия.

**Текущий экспериментальный предел пространственного разрешения** — около  $10^{-19}$  м.

Наибольшие энергии в столкновениях элементарных частиц достигаются сейчас на Большом адронном коллайдере (БАК или LHC). Работавший с 2010 г. на энергиях 7 и 8 ТэВ<sup>1</sup>, в 2015 г. после модернизации БАК перешел на энергию 13 ТэВ. Такие энергии соответствуют наименьшему пространственному разрешению (порядка  $10^{-19}$  м), достижимому в современном эксперименте.

Кроме многих важных физических результатов (в частности, в 2012 г. был открыт бозон Хиггса), из анализа экспериментальных данных БАКА следует, что *фундаментальные частицы* — электрон и другие лептоны,

<sup>1</sup> 1 ТэВ =  $10^{12}$  эВ.

а также кварки — при данных энергиях столкновений выглядят точечными. Таким образом, если у тех частиц, которые мы сейчас считаем действительно элементарными, есть какая-либо гипотетическая внутренняя структура и конечный размер, то этот размер меньше чем  $10^{-19}$  м.

**Планковская длина** —  $1,6 \cdot 10^{-35}$  м.

В описаниях всех физических явлений, во всех физических теориях встречаются три *фундаментальные физические постоянные*<sup>1</sup>:

- постоянная Планка  $h$ ,
- гравитационная постоянная  $G$ ,
- скорость света  $c$ .

Из этих величин можно составить комбинацию, имеющую размерность длины — *планковскую длину* (ее еще называют *планковский масштаб*):

$$l_P = \sqrt{\frac{hG}{2\pi c^3}} \approx 1,616229(38) \cdot 10^{-35} \text{ м.}$$

Некоторые теоретические соображения указывают на то, что планковская длина является наименьшим возможным размером объекта. Иначе говоря, планковская длина может являться пределом расстояния, меньше которого сами понятия пространства и длины перестают существовать.

*Планковская энергия* — энергия, которая соответствует планковской длине. Она составляет порядка  $10^{19}$  ГэВ, что на 16 порядков превышает максимальную энергию, достижимую на современных ускорителях.

Таким образом, в понимании фундаментальной физики мы продвинулись вглубь до  $10^{-19}$  м, и еще примерно 16 порядков находятся вне нашего понимания и могут содержать удивительные явления и закономерности.

## Мегамир

Мегамир — это мир объектов, которые несоизмеримо больше человека.

**Горы, ледники, озера** — характерный размер  $10^4$  м.

Само понятие Мегамира довольно условно (впрочем, как и микромира). Какие именно объекты следует относить к Мегамиру? Мы можем сказать, что это такие объекты, которые, в силу своих колоссальных размеров, пока не могут быть *созданы* человечеством.

<sup>1</sup>Постоянная Планка  $h \approx 6,6260700 \cdot 10^{-34}$  Дж · с; гравитационная постоянная  $G \approx 6,674 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$ ; скорость света  $c = 299792458$  м/с (последнее значение приводится точно, поскольку с 1983 г. метр в Международной системе единиц (СИ) определен как расстояние, которое проходит свет в вакууме за промежуток времени, равный  $1/299792458$  секунды).

Самыми «маленькими» из таких объектов являются горы, ледники, айсберги, озера, каньоны и т. п. — характерный объем больше  $1 \text{ км}^3$ , а вес больше 1 млрд тонн ( $10^{12} \text{ кг}$ ).

**Планета Земля** — характерный размер  $10^7 \text{ м}$ .

Средний радиус Земли составляет 6371 км, масса около  $6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ . Представить и осознать подобные величины невозможно. Чуть легче представить количество воды и воздуха в сравнении с Землей в целом — масса всей воды (включая воду в океанах, реках, всех других водоемах и растворенную в литосфере)  $1.5 \cdot 10^{18} \text{ кг}$ ; масса всего воздуха  $5 \cdot 10^{18} \text{ кг}$ . Эти величины намного нагляднее: если всю воду собрать в шар, то его радиус будет всего около 71 км, а радиус шара из воздуха при атмосферном давлении — около 1000 км.

Приведем еще несколько фактов о размерах Земли. Самые высокие горы (высотой около 9 км), в сравнении с планетой в целом, возвышаются над поверхностью Земли менее, чем пупырышки на баскетбольном мяче. В глубь поверхности Земли человечество проникло всего на 12 км (Кольская сверхглубокая скважина находится в Мурманской области; интересно, что пробурена она научно-производственным центром «Недра», базирующимся в Ярославле).

**Солнце** — характерный размер  $10^9 \text{ м}$ .

Земля движется вокруг Солнца по эллипсу (впрочем очень близкому к окружности); среднее расстояние до Солнца около 149,6 млн км, такую величину в астрономии называют — 1 астрономическая единица (1 а. е.  $\approx 1,496 \cdot 10^{11} \text{ м}$ ). Свет проходит это расстояние примерно за 500 секунд (8 минут 20 секунд).

Средний диаметр Солнца  $1,392 \cdot 10^9 \text{ м}$  (109 диаметров Земли), а масса  $2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$  (примерно 332 940 масс Земли). Основным источником энергии Солнца является термоядерный синтез гелия из водорода. Температура поверхности Солнца около 6000 К. По массе и спектру излучения Солнце называют *желтым карликом* (тип небольших звезд, имеющих массу от 0,8 до 1,2 массы Солнца и температуру поверхности 5000—6000 К).

Время жизни желтого карлика составляет в среднем 10 миллиардов лет. После того как сгорает весь запас водорода, звезда во много раз увеличивается в размере и превращается в красный гигант. Затем красный гигант выбрасывает внешние слои газа, образуя тем самым планетарные туманности, а ядро коллапсирует в маленький плотный *белый карлик*<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>Вообще, конечным этапом в жизни звезды в зависимости от ее массы может быть: коричневый карлик (звезды малой массы); белый карлик, нейтронная звезда, черная дыра (для звезд *главной последовательности*). Подробнее см. [1, 2].

**Солнечная система** — характерный размер  $10^{13}$  м.

Солнечная система — планетная система, включающая в себя центральную звезду — Солнце и все естественные космические объекты, обращающиеся вокруг Солнца. Она сформировалась путем гравитационного сжатия газопылевого облака примерно 4,57 млрд лет назад. Почти вся масса Солнечной системы приходится на Солнце; масса всех остальных объектов составляет лишь примерно 0,0014 от массы Солнца. В Солнечной системе 8 планет — Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун. Со дня своего открытия в 1930 и до 2006 г. Плутон считался девятой планетой Солнечной системы. Однако в конце XX и начале XXI в. во внешней части Солнечной системы было открыто множество объектов. Среди них примечательны Кварвар, Седна и особенно Эрида, которая на 27 % массивнее Плутона. Эти объекты вместе с Плутоном было решено объединить в группу *карликовых планет*.

**Галактика «Млечный путь»** — характерный размер  $10^{21}$  м.

Солнечная система находится в галактике, называемой «Млечный путь» (слово галактика происходит от древнегреческого и означает Млечный путь). Диаметр нашей галактики примерно 100000 световых лет.

В астрономии для измерения расстояний используют также особую единицу — парсек. Появление этой единицы связано с методом измерения расстояний до не слишком удаленных звезд: измеряют положение звезды на небе по отношению к более далеким неподвижным звездам, затем повторяют измерение через полгода и, зная диаметр земной орбиты, по угловому смещению определяют расстояние (см. рис. В.7).

Один парсек — это расстояние, соответствующее угловому смещению в одну угловую секунду. Название образовано из сокращений слов «параллакс» и «секунда»; парсек равен расстоянию до объекта, годичный тригонометрический параллакс которого равен одной угловой секунде.

**1 световой год** — это расстояние, которое свет проходит за год,

**1 световой год**  $\approx 10^{16}$  м; **1 пк**  $\approx 3,26$  светового года.

По современным оценкам галактика содержит от 200 до 400 миллиардов звезд. В центре галактики находится сверхмассивная черная дыра с массой около миллиона солнечных масс. Солнечная система проходит путь вокруг центра галактики примерно за 250 млн лет.

Солнце относится к звездам третьего поколения. Это означает, что в нашей области галактики ранее уже существовали два поколения звезд, которые, проэволюционировав, т. е. исчерпав запас термоядерного топлива, взрывались и образовывали молекулярные облака, из которых рождались звезды следующего поколения.

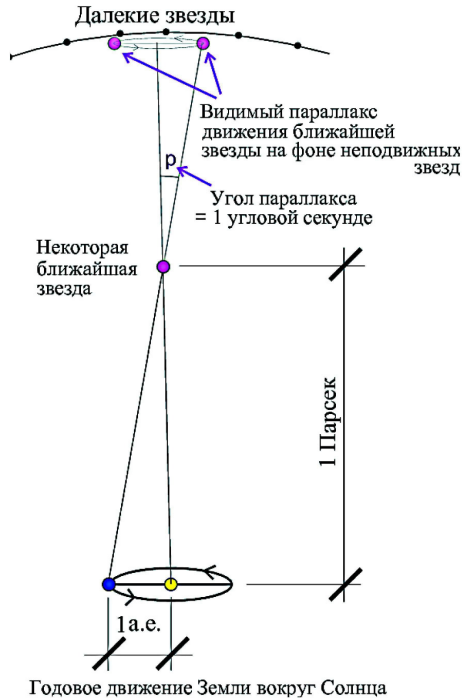


Рис. В.7. Параллакс звезды

**Видимая Вселенная** — характерный размер  $10^{27}$  м.

Как мы сейчас знаем, Вселенная родилась примерно 13,8 млрд лет назад из *космологической сингулярности* — сверхмалого, сверхплотного, сверхгорячего состояния. Закономерности дальнейшей эволюции Вселенной определялись физикой на этих сверхмалых — планковских — расстояниях.

Поэтому нашу «линейку» характерных масштабов мы изобразили в форме Уробороса — Змея, кусающего себя за хвост (см. рис. В.1). Этот один из древнейших известных человечеству символов в какой-то мере отражает связь в современном понимании законов природы между физикой самых малых и самых больших масштабов.

Шелдон Глэшу пишет [3, с. 203]:

*«В первые мгновения образования Вселенной все было настолько горячим, что физика частиц и ее «зоопарк», населенный кварками и лептонами, обладали верховной властью во всей Вселенной. Линейка свернулась в клубок — это уже не линейка, а змея, которая проглатывает свой хвост, Уроборос. Физи-*

*ка микромира — это физика всего космоса. Большое и малое едины. Наши земные ускорители одновременно являются и микроскопами с небесным разрешением, и миниатюрными копиями великого ускорителя, в котором все они находятся, — всей Вселенной».*

## **Вопросы для самоконтроля**

- 1.** Какие масштабы расстояний характерны для микро-, макро- и мегамира?
- 2.** Почему молекулы и атомы невозможно рассмотреть в оптический микроскоп?
- 3.** Как в современной астрофизике определяется единица расстояния — парсек? Укажите связь между парсеком, астрономической единицей и световым годом.



# Глава 1

## Эволюция физики от классической механики Ньютона до теории относительности Эйнштейна

Классическая механика дает наглядное и ясное описание движения тел, основанное на небольшом числе первопринципов — обобщениях множества опытных данных. Еще глубже в основании классической механики лежат свойства пространства и времени — простейшие из возможных: абсолютное, однородное и изотропное пространство, абсолютное и равномерное время.

В ходе развития физики оказалось, что интуитивные представления о пространстве, времени и движении неверны. Одной из величайших революций в истории науки стало значительное изменение этих основополагающих понятий в теории относительности.

### 1.1. Основы классической механики, базовые понятия и концепции

В IV в. до н. э. Аристотель сделал первую попытку сформулировать законы движения. Предмет падает пропорционально своему весу: чем тяжелее камень, тем быстрее он достигает поверхности земли. В случае других видов движения (двигаем ли мы книгу по поверхности стола, тянем ли плуг по полю) *силу нужно прилагать постоянно*. Чем больше прилагаемая сила, тем быстрее двигается предмет.

Теперь мы знаем: эти законы ошибочны. Например, любое тело продолжает двигаться *по инерции* до тех пор, пока какая-либо причина не изменит его скорость, а скорость падения тел не зависит от их масс. Однако Аристотель жил в мире ручного труда, медленных перемещений, несовершенных механизмов, и в этом мире главной силой была сила трения, поэтому его

законы выглядели справедливыми и естественными. А каких-либо экспериментов для их проверки в более общих условиях Аристотель не ставил. Долгое время физика оставалась лишь областью философии, черпающей свои идеи исключительно из размышлений.

Историю развития физики как науки следует отсчитывать со времен Галилео Галилея (1564–1642). Галилей заложил основы *классической механики*, которые в дальнейшем были развиты Ньютоном, Гуком, Лапласом, Эйлером, Лагранжем, Гамильтоном и др.

Основываясь на многочисленных опытах и наблюдениях, Галилей предложил принцип, который назвали принципом относительности Галилея. Этот принцип лежит в основе механики.

### **Принцип относительности Галилея:**

Если в двух замкнутых лабораториях, одна из которых равномерно прямолинейно и поступательно движется относительно другой, провести одинаковый механический эксперимент, результат будет одинаковым.

Для описания движения необходимым является понятие системы отсчета.

**Система отсчета** — это совокупность тела отсчета, связанной с ним системы координат и системы отсчета времени (часов), по отношению к которым рассматривается движение каких-либо тел.

Особую роль в физике играет **Инерциальная система отсчета (ИСО)**. Это система отсчета, в которой справедлив закон инерции: любое тело, на которое не действуют внешние силы, находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения. Всякая система отсчета, движущаяся относительно ИСО равномерно и прямолинейно, также является ИСО.

В современной физике формулируют **Принцип относительности Галилея** с использованием понятия ИСО:

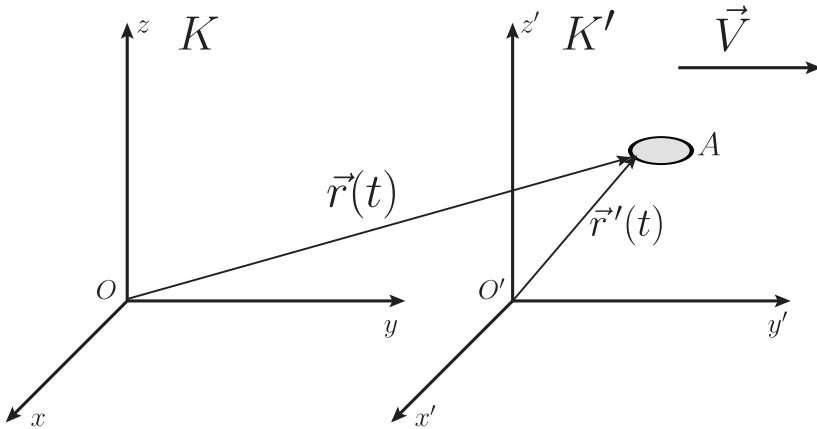
**Все механические явления происходят одинаково во всех ИСО.**

При переходе от одной ИСО к другой преобразуются координаты и скорости. Эти преобразования называются **преобразованиями Галилея**.

Рассмотрим две инерциальные системы отсчета  $K$  и  $K'$ ; система  $K'$  движется относительно системы  $K$  со скоростью  $\vec{V}$  (см. рис. 1.1). В системе отсчета  $K$  положение тела в некоторый момент времени  $t$  описывается радиус вектором  $\vec{r}(t)$ , а  $\vec{v}(t)$  — скорость этого тела. В системе  $K'$  это же тело имеет радиус-вектор  $\vec{r}'(t)$  и скорость  $\vec{v}'(t)$ .

Тогда

$$\begin{aligned}\vec{r}(t) &= \vec{r}'(t) + \vec{V}t, \quad t = t', \\ \vec{v}(t) &= \vec{v}'(t) + \vec{V},\end{aligned}$$

Рис. 1.1. Движение тела А в системах отсчета  $K$  и  $K'$ 

где первое выражение показывает, как будет выглядеть в системе отсчета  $K$  радиус-вектор тела  $\vec{r}(t)$  (или, говоря иначе, закон движения  $\vec{r}(t)$ ), если в системе  $K'$  движение этого тела описывается радиус-вектором  $\vec{r}'(t)$ . Время не изменяется — время абсолютно и не зависит от системы отсчета. Второе выражение носит название **классический закон сложения скоростей**.

В простейшем случае, если ИСО  $K'$  движется относительно ИСО  $K$  с постоянной скоростью  $V$  вдоль оси  $x$ , преобразования Галилея имеют вид

$$x = x' + Vt, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t'.$$

В классической механике свойства пространства и времени, необходимые для описания движения, принимаются исходя из интуитивных представлений.

**Пространство** — *евклидово*, *абсолютно* (не зависит от наблюдателя и от находящихся в нем тел), *однородно* (свойства пространства не меняются от точки к точке) и *изотропно* (все направления в пространстве равнозначны). Это подразумевает наличие фиксированной системы отсчета, неизменной и неподвижной, позволяющей описать положение и движение любого тела. Земля не находится в состоянии покоя, вращаясь вокруг Солнца. Солнце также движется, однако, как утверждал Ньютон, во Вселенной существует нечто подобное фиксированной системе отсчета, позволяющее описать абсолютное положение и абсолютное движение:

«Пространство — пустоеместилище тел».

**Время** — абсолютно и равномерно, т. е. время течет равномерно безотносительно к чему-либо, как часы, единые для всей Вселенной:

«Время —местилище событий».

На основе принципа относительности Галилея и представлений об абсолютных пространстве и времени Ньютон построил **классическую механику**. Механика стоит на «трех китах» — трех законах Ньютона.

### 1.1.1. Законы Ньютона

Законы *динамики* были установлены Исааком Ньютоном (1643–1727) и носят его имя. Как и другие принципы, лежащие в основе физики, они являются *обобщением опытных фактов*. На них следует смотреть не как на изолированные независимые утверждения, а как на систему взаимосвязанных законов. Опытной проверке подвергается не каждый закон в отдельности, а вся система в целом.

**I закон (закон Инерции)**. Существуют такие системы отсчета, называемые инерциальными, относительно которых тела, когда на них не действуют никакие силы (или действуют силы взаимно уравновешенные), находятся в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения. Таким образом, **I закон постулирует существование ИСО**.

Инерциальные системы отсчета представляют собой *математическую идеализацию* и в природе не встречаются, так как не существует свободных тел: на любое тело действуют те или иные силы. Однако есть системы отсчета, которые с разной степенью точности и в зависимости от конкретной задачи можно приближенно считать инерциальными; наиболее часто используются системы отсчета, связанные с поверхностью Земли, центром Земли, Солнцем или далекими звездами.

**II закон**. В инерциальной системе отсчета ускорение, с которым движется тело, пропорционально действующей на него силе (точнее, равнодействующей всех приложенных к нему сил) и обратно пропорционально его массе:

$$1) m\vec{a} = \vec{F}$$

или

$$2) \vec{F} = m\vec{a},$$

где  $m$  — масса тела,  $\vec{a}$  — ускорение тела,  $\vec{F}$  — *равнодействующая* всех действующих сил.

Формально эти выражения эквивалентны. Однако уравнения принято записывать таким образом, чтобы внешние условия (условия, задаваемые заранее или конструируемые из условий задачи) располагались справа,

т. е. в первом случае заданной считается сила  $\vec{F}$  и требуется по известной силе определить ускорение (прямая задача), во втором же случае по известному ускорению  $\vec{a}$  требуется найти силу (обратная задача).

*Основная задача механики* — находить координаты движущихся тел в любой момент времени (т. е. законы движения) по известным силам и начальным условиям — начальным положениям и скоростям тел.

На первый взгляд кажется, что уравнение второго закона Ньютона очень простое и что решается оно тоже просто. Однако надо помнить, что уравнение  $m\vec{a} = \vec{F}$  — векторное. Это значит, что за ним «скрываются» три скалярных уравнения для проекции силы и ускорения на оси координат:

$$\begin{aligned} ma_x(t) &= F_x(t), \\ ma_y(t) &= F_y(t), \\ ma_z(t) &= F_z(t). \end{aligned}$$

Кроме того, выше написан II закон Ньютона для одного тела. В реальных же задачах для описания движения нескольких тел II закон приводит к системе уравнений, или, точнее, *системе нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка*:

$$m_i \frac{d^2 \vec{r}_i(t)}{dt^2} = \vec{F}_i(t, \{\vec{r}_i\}, \{\vec{v}_i\}),$$

где  $m_i$  — масса  $i$ -го тела,  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  — число тел в исследуемой задаче,  $\frac{d^2}{dt^2}$  — обозначение для второй производной по времени, т. е. здесь  $\frac{d^2 \vec{r}_i(t)}{dt^2}$  — ускорение  $i$ -го тела,  $\vec{F}_i$  — полная сила действующая на  $i$ -е тело со стороны всех других тел, эта сила может зависеть от времени  $t$ , положений всех тел ( $\{\vec{r}_i\} = \vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_N$ ) и всех скоростей ( $\{\vec{v}_i\} = \vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_N$ ).

Для решения такой системы уравнений необходимо знать начальные условия — начальные положения и скорости всех тел, т. е. задать радиус-векторы всех тел в начальный момент времени  $\vec{r}_i(0) = \vec{r}_{i0}$  и все скорости  $\vec{v}_i(0) = \vec{v}_{i0}$ .

Сложность аналитического решения этой системы уравнений катастрофически растет с увеличением числа взаимодействующих тел. Уже для всего лишь трех тел ( $N = 3$ , *Задача трех тел*) описанная выше система уравнений является столь сложной, что оказывается невозможным получить точное аналитическое решение в общем случае. Тем не менее были развиты методы приближенного решения уравнений Ньютона во многих частных случаях. Например, оказывается возможным достаточно точно вычислить движения всех крупных тел Солнечной системы (8 планет, карликовые планеты, сотни спутников, крупные астероиды и т. д.).

**III закон.** В инерциальной системе отсчета тела взаимодействуют друг с другом силами, имеющими одинаковую природу, направленными вдоль прямой, соединяющей эти тела, равными по модулю и противоположными по направлению:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}.$$

В механике Ньютона считается, что взаимодействие между телами передается мгновенно с бесконечно большой скоростью (*дальнодействие*). Дальнейшее развитие науки показало, что это утверждение неверно.

Несмотря на отмеченные выше трудности с точными решениями для задач взаимодействия многих тел, механика крайне успешно развивалась в течение двух столетий и достигла огромных успехов.

Еще в конце XIX в. считалось, что можно объяснить любое физическое явление, если свести его к механическому процессу, подчиняющемуся законам Ньютона. И на этом пути были построены многие теории, объясняющие совершенно различные явления. Помимо собственно механики, изучающей движения тел, развивались гидродинамика (движения жидких сред); корпускулярная теория света объясняла многие оптические явления; молекулярно-кинетическая теория — тепловые явления и т. д.

В любой естественной науке нет абсолютно истинных утверждений, справедливых при любых условиях. Все физические теории и модели справедливы только в некоторой области параметров, где эти теории были установлены. Иногда оказывается, что теория продолжает работать и при значительном изменении этих рамок, в других же случаях в новых условиях старая теория будет неправильной.

С развитием эксперимента и у классической механики Ньютона проявились **пределы применимости**:

1. Скорости движения тел должны быть много меньше скорости света  $v \ll c$  ( $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с), т. е. движения *нерелятивистские*;
2. Характерные размеры тел и расстояния много больше размера атома  $R \gg 10^{-10}$  м — эффекты квантовой механики можно не учитывать.

Классическая механика получила свое развитие в новых теориях — специальной теории относительности (СТО) и квантовой механике.

В СТО, созданной Эйнштейном в 1905 г., подверглись радикальному пересмотру ньютоновские представления о пространстве и времени. Этот пересмотр привел к созданию релятивистской механики (механики больших скоростей). Однако новая механика не привела к полному отрицанию ньютоновской механики. Уравнения релятивистской механики для скоростей, малых по сравнению со скоростью света, переходят в уравнения

классической механики. Таким образом, классическая механика вошла в релятивистскую как частный случай и сохранила свое прежнее значение для описания движений, происходящих со скоростями, значительно меньшими скорости света.

Аналогично обстоит дело и с соотношением между классической и квантовой механикой, возникшей в 20-х годах XX в. в результате развития физики атома. Уравнения квантовой механики также дают в пределе уравнения классической механики. Следовательно, классическая механика вошла и в квантовую механику в качестве ее предельного случая. Таким образом, развитие науки не перечеркнуло классическую механику, а лишь показало ее *ограниченную применимость*.

Классическая механика, основывающаяся на законах Ньютона, является механикой тел больших (по сравнению с массой атомов) масс, движущихся с малыми (по сравнению со скоростью света) скоростями.

## 1.2. Специальная теория относительности (СТО)<sup>1</sup>

### 1.2.1. Проблемы, приведшие к созданию СТО

**1. Нарушение принципа относительности Галилея в теории электромагнитных явлений — электродинамике.**

В XIX в. окончательно сформировались представления об электромагнитном поле, а именно Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879) написал уравнения, которые не только описывали все известные электромагнитные явления, но и предсказывали существование электромагнитных волн, которые вскоре были открыты Генрихом Герцем.

С развитием электродинамики оказалось, что законы электромагнетизма и законы механики, в частности формулировка принципа относительности Галилея, не согласуются друг с другом. Уравнения механики в известном тогда виде не менялись после преобразований Галилея, а уравнения Максвелла при применении этих преобразований к ним самим или к их решениям меняли свой вид и, главное, давали другие предсказания (например, измененную скорость света).

**2. Опыт Майкельсона–Морли по определению зависимости скорости света от скорости движения наблюдателя.**

Предполагалось, что световые колебания распространяются в некоторой среде, которую называли *эфир*. Считалось, что скорость света зависит

---

<sup>1</sup>Подробнее о СТО см., например, [4, 5].

от скорости движения эфира, подобно волнам на воде при течении реки. При этом эфиру необходимо было приписать противоречивые свойства — неощутимость для вещества, поперечную упругость, огромную по сравнению с газами или жидкостями скорость распространения колебаний и др.

Если существует эфир, заполняющий все пространство, то мы движемся сквозь него, по крайней мере, со скоростью орбитального движения Земли вокруг Солнца, равной  $v_{орб} = 30$  км/с; если Солнце тоже движется, наша скорость относительно эфира должна быть даже больше (рис. 1.2).

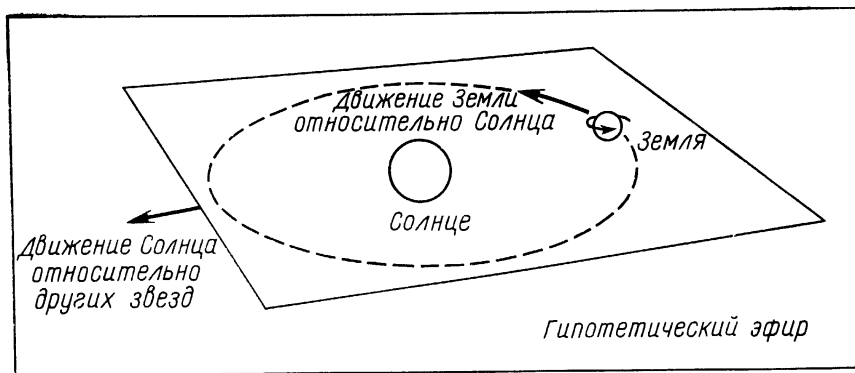


Рис. 1.2. Движение Земли в гипотетическом эфире

Рисунок из книги А. Бейзера «Основные представления современной физики» (М.: Атомиздат, 1973).

Альберт Майкельсон (1852–1931) экспериментально измерял скорость света. Около 1880 г. он изобрел оптический прибор исключительно высокой точности, который назвал *интерферометром*. Целью первого эксперимента (1881) было измерение зависимости скорости света от движения Земли относительно эфира. Позже, в 1887 г., А. Майкельсон совместно с Э. Морли провели аналогичный, но существенно более точный эксперимент, известный как эксперимент Майкельсона—Морли.

В опыте Майкельсон измерил время, которое потребовалось свету, чтобы пройти небольшой путь туда и обратно в лаборатории. При этом он хотел проверить, будет ли получен один и тот же результат, если свет идет параллельно направлению движения Земли вокруг Солнца и перпендикулярно к нему. Ожидаемая разница должна быть чрезвычайно незначительной, и нужна была большая виртуозность, чтобы обнаружить ее.

Майкельсон проделал указанный эксперимент, повторил его во множестве модификаций. Приборы Майкельсона обладали достаточно высокой



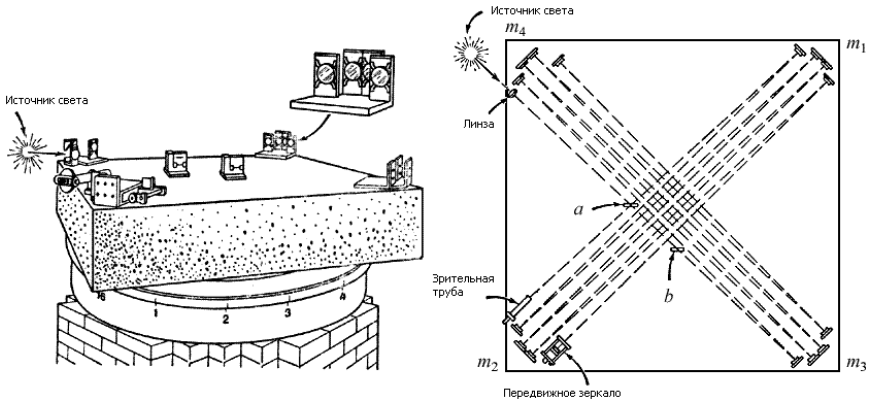


Рис. 1.3. Интерферометр в установке Майкельсона–Морли  
 Рисунок из книги Б. Джеффа «Майкельсон и скорость света»  
 (М.: Иностранная литература, 1963).

чувствительностью, чтобы измерить скорость движения Земли относительно эфира (если он существует), регистрируя изменение скорости света в зависимости от того, движется ли Земля в том или ином направлении по отношению к эфиру — среде, где сконцентрировано электромагнитное поле, или вообще неподвижна по отношению к нему. Он получил нулевой результат. Это было столь неожиданным, что эксперимент повторялся на протяжении десятилетий со множеством усовершенствований и во многих вариантах.

Опыт дал отрицательный ответ на поставленный вопрос, а именно

**скорость света не зависит от скорости движения источника и наблюдателя и представляет собой некоторую фиксированную константу,**

которую они измерили.

В итоге к концу XIX в. в теории эфира возникли непреодолимые трудности, вынудившие физиков отказаться от понятия эфира и признать электромагнитное поле самостоятельным физическим объектом, не нуждающимся в дополнительном носителе.

Вместе с тем само существование такого физического объекта (света), имеющего скорость одинаковую во всех инерциальных системах отсчета, требовало *пересмотра физических представлений о пространстве и времени.*

Начиная уже с середины 1880-х гг. шел поиск теории, позволяющей устранить эти проблемы. В этой работе участвовали физики Х. Лоренц, А. Пуанкаре, Дж. Фицджеральд, В. Фогт, Дж. Лармор, Э. Мах и др.

Ими были получены некоторые математические выражения (например, *преобразования Лоренца*) и эффекты (*сокращение длин*), впоследствии вошедшие в теорию относительности. Однако построить полную и логически последовательную теорию не удавалось.

Решающая роль в разрешении противоречий классической механики и электродинамики принадлежит Альберту Эйнштейну (1879–1955). В сентябре 1905 г. Эйнштейн публикует работу «К электродинамике движущихся тел». Несмотря на «электродинамическое» название, работа Эйнштейна существенно отличалась по своему характеру от работ Пуанкаре и Лоренца. Она была проста в математическом плане и содержала ясное описание новых представлений о пространстве и времени.

### 1.2.2. Специальная теория относительности А. Эйнштейна

Эйнштейн строит свою теорию *аксиоматическим* способом, т. е. на основе небольшого количества аксиом — исходных положений, из которых строгим логическим путем выводятся все остальные положения теории. Аксиоматика имеет научную ценность, потому что она ясно передает все реально используемые предположения и тем самым делает возможным сохранять контроль над ними.

В первую очередь в СТО, как и в классической механике, предполагается, что пространство и время однородны, а пространство также изотропно. Кроме того, вводятся постулаты как исходные положения теории, не требующие доказательства.

#### **Постулат 1 (принцип относительности Эйнштейна):**

Все физические явления происходят одинаково во всех инерциальных системах отсчета.

Этот постулат обобщает принцип относительности Галилея на все физические процессы.

#### **Постулат 2:**

Существует максимальная скорость передачи взаимодействий между объектами, она одинакова во всех инерциальных системах отсчета и равна скорости света в вакууме.

Скорость света в вакууме  $c = 299792458 \text{ м/с} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ . В настоящее время скорость света выбрана эталоном, через нее определяют единицу расстояния — метр, поэтому значение этой *фундаментальной физической постоянной* является точным.

Скорость света на много порядков больше скоростей, с которыми мы имеем дело в обычной жизни. Именно ее непривычно большая величина мешает интуитивному пониманию основного содержания теории относительности. Частицы, движущиеся со скоростями порядка скорости света, называют *релятивистскими*.

Второй постулат исключает из физических теорий взаимодействия, передающиеся бесконечно быстро, т. е. дальноедействие.

Следствием постулатов СТО являются, в частности, **преобразования Лоренца**, заменяющие собой преобразования Галилея в случае *релятивистского движения* — движения со скоростями, близкими к скорости света. Эти преобразования связывают между собой координаты и времена одних и тех же событий, наблюдаемых из различных инерциальных систем отсчета.

### Вид преобразований Лоренца

Если ИСО  $K'$  движется относительно ИСО  $K$  с постоянной скоростью  $V$  вдоль оси  $x$ , а начала координат совпадают в начальный момент времени в обеих системах, то преобразования Лоренца имеют вид:

$$t = \frac{t' + (V/c^2)x'}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}, \quad x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}, \quad y = y', \quad z = z',$$

где  $c$  — скорость света в вакууме.

В этих преобразованиях пространственная и временная координаты «смешиваются». Величина, которую один наблюдатель может измерить, пользуясь только линейкой, другой наблюдатель определит, пользуясь и линейкой, и часами.

Обратите внимание, что в пределе  $v \ll c$  (или формально  $c \rightarrow \infty$ ) преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея, что соответствует применимости классической механики при скоростях тел малых по сравнению со скоростью света. Использование преобразований Лоренца разрешило проблему с нарушением принципа относительности Галилея в теории электромагнитных явлений.

### 1.2.3. Следствия Специальной теории относительности

#### 1. Четырехмерное пространство-время

Создание СТО позволило по-новому взглянуть на пространство и время. Как показал Герман Минковский (1864–1909), пространство и время образуют единую четырехмерную структуру — *пространство-время*:

«Отныне пространство само по себе и время само по себе должны обратиться в фикции, и лишь некоторый вид соединения обоих должен еще сохранить самостоятельность»<sup>1</sup>.

В качестве состояния объекта в таком пространстве времени служит понятие события — что произошло с объектом, где и когда. В четырехмерном пространстве-времени координаты события обозначаются точкой. Эта точка называется *мировой точкой*. Совокупность мировых точек образует траекторию объекта в четырехмерном пространстве времени.

События можно описать с помощью четырех координат, представляющих собой компоненты *4-вектора*.

Рассмотрим, например, два таких 4-вектора:

$X_1 = (ct_1, x_1, y_1, z_1)$  — координаты первого события, например, испускание светового сигнала в момент времени  $t_1$  в точке пространства с координатами  $x_1, y_1, z_1$ .

$X_2 = (ct_2, x_2, y_2, z_2)$  — координаты второго события, например, прием светового сигнала в момент времени  $t_2$  в точке пространства —  $x_2, y_2, z_2$ .

Оказывается, что в четырехмерном пространстве-времени, аналогом расстояния в трехмерном евклидовом пространстве<sup>2</sup>, является *интервал* между событиями. Пространство-время является *неевклидовым*, а точнее, *псевдо-евклидовым*, а квадрат интервала — квадрат расстояния между событиями — определяется как<sup>3</sup>

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

В отличие от расстояния в евклидовом пространстве, квадрат интервала  $s^2$  не является знакоопределенным.

Если  $s^2 > 0$ , то интервал называется *временеподобным*. Временеподобный интервал между событиями означает, что существует такая система отсчета, в которой оба события произошли в одном и том же месте.

Если  $s^2 = 0$ , то интервал называется *светоподобным*.

Если  $s^2 < 0$ , то интервал называется *пространственноподобным*.

<sup>1</sup>Минковский Г. Доклад на 80-м съезде немецких естествоиспытателей в Кёльне. 1908.

<sup>2</sup>Напомним, что квадрат расстояния между точками в трехмерном евклидовом пространстве определяется как  $l^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2$ .

<sup>3</sup>Иначе эту формулу можно записать в виде

$$s^2 = \sum_{\mu, \nu=1}^4 \eta_{\mu\nu} \Delta x^\mu \Delta x^\nu,$$

где  $\eta_{\mu\nu}$  — диагональная матрица с компонентами  $(1, -1, -1, -1)$ , являющаяся *метрическим тензором* пространства Минковского.

**Принцип причинности** — два события могут быть причинно связаны, только если их разделяет интервал  $s^2 \geq 0$ , т. е. времени- или светоподобный.

Мы можем наблюдать только причинно-связанные с нами области пространства-времени, таким образом недоступны для наблюдения события, происходящие в данный момент в удаленных звездных системах. Мы можем видеть только события из их далекого прошлого.

## 2. Замедление времени

В движущейся системе отсчета время течет медленнее относительно неподвижной системы отсчета.

## 3. Сокращение длин

В движущейся системе отсчета размер тела (длина объекта) уменьшается в направлении движения относительно неподвижной системы отсчета.

Например, если космический корабль полетит к ближайшей к Солнечной системе звезде (Проксима Центавра, расстояние 4,22 св. года) со скоростью  $0,9 c$ , то для земного наблюдателя корабль пробудет в пути примерно 4,7 лет, на корабле же пройдет лишь 2 года. Этот пример иллюстрирует и эффект замедления времени, и эффект сокращения длин: для наблюдателя на Земле корабельные часы будут идти медленнее, и тогда через 4,7 лет, прошедших на Земле, корабль прибудет в систему Проксимы Центавра, при этом по часам корабля пройдет 2 года. А с точки зрения команды корабля сократится расстояние от Земли до Проксимы Центавра.

## 4. Относительность понятия одновременности

Два события могут происходить одновременно в одной системе отсчета, но в разные моменты времени в другой системе отсчета.

## 5. Релятивистская динамика. Эквивалентность массы и энергии

При движении с околосветовыми скоростями видоизменяются также и законы динамики. Так, можно вывести, что второй закон Ньютона, связывающий силу и ускорение, должен быть модифицирован при скоростях тел, близких к скорости света. Кроме того, можно показать, что и выражение для импульса и кинетической энергии тела уже имеет более сложную зависимость от скорости, чем в нерелятивистском случае.

Из СТО также следует, что любой объект массы  $m$  обладает энергией

$$E_0 = mc^2,$$

называемой *энергией покоя*; обратите внимание, что ни энергия покоя, ни масса тела не зависят от скорости движения.

Полная же энергия тела

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

зависит от скорости движения — именно полная энергия тела является мерой инерции в теории относительности (при малых скоростях тел, полная энергия мало отличается от энергии покоя, которая пропорциональна массе, поэтому мерой инерции в ньютоновской механике выступает масса).

Связь массы тела с энергией, запасенной в этом теле, стала одним из главных и практически важных результатов специальной теории относительности. Выяснилось, что в веществе заложены огромные (благодаря квадрату скорости света) запасы энергии, которые могут быть использованы в энергетике и военных технологиях.

\* \* \*

Специальная теория относительности получила многочисленные подтверждения на опыте и является, безусловно, верной теорией в своей области применимости. Специальная теория относительности перестает работать в масштабах всей Вселенной, а также в случаях сильных полей тяготения, где ее заменяет более общая теория — общая теория относительности. Специальная теория относительности применима и в микромире. Ее синтезом с квантовой механикой является *квантовая теория поля*.

### 1.3. Общая теория относительности

В механике Ньютона гравитация описывается *законом всемирного тяготения*. Этот закон использует концепцию *дальнодействия*, т. е. мгновенную передачу взаимодействия на любые расстояния. Однако существование максимальной скорости передачи взаимодействия — скорости света — запрещает существование дальнодействующих сил.

Альберт Эйнштейн с 1905 г. работал над последовательным использованием СТО в описании гравитации. И в 1915–1916 гг. им были опубликованы две статьи, в которых излагалась общая теория относительности (ОТО).

Общая теория относительности является развитием и обобщением идей СТО на случай неинерциальных систем отсчета (неИСО), в частности на гравитационные явления. Поэтому ОТО называют также *классической теорией гравитации*.

### 1.3.1. Основные идеи ОТО

1. Равенство инертной и гравитационной масс. Масса, которая входит во второй закон Ньютона

$$m_{\text{ин}} \vec{a} = \vec{F},$$

называется *инертной*, а масса, входящая в закон всемирного тяготения

$$F_{\text{грав}} = G_N \frac{m_{\text{грав1}} m_{\text{грав2}}}{R^2},$$

— *гравитационной* массой. Эти массы могли бы существенно различаться.

Однако еще Ньютон предполагал равенство этих масс и проверил его экспериментально с относительной точностью  $10^{-3}$ . В течение XX в. экспериментальная техника позволила подтвердить равенство инертной и гравитационной масс с большой относительной точностью<sup>1</sup>. Основываясь на этом равенстве, Эйнштейн предложил **принцип эквивалентности**:

Силы гравитационного взаимодействия пропорциональны гравитационной массе тела, силы инерции же пропорциональны инертной массе тела. Если инертная и гравитационная массы равны, то невозможно отличить, какая сила действует на данное тело — гравитационная или сила инерции.

Иными словами, движение в неинерциальной системе отсчета эквивалентно движению в некотором гравитационном поле.

#### Лифт Эйнштейна

Для доказательства принципа эквивалентности Эйнштейн предложил следующий мысленный эксперимент. Пусть тела находятся в лифте, который бесконечно удален от гравитирующих тел и движется с ускорением. Тогда на все тела, находящиеся в лифте, действует сила инерции, а тела под действием этих сил будут давить на опору, т. е. тела будут обладать весом. Если лифт не движется, а висит над какой-то гравитирующей массой в однородном поле, то все тела также будут обладать весом. Находясь в лифте, невозможно отличить эти две силы, поэтому все механические явления будут в обоих лифтах происходить одинаково (см. рис. 1.4).

Эйнштейн обобщил это положение на все физические явления.

<sup>1</sup>Экспериментальная точность экспериментов Брагинского, Дикке и др. составляет  $10^{-13}$ , т. е. если инертная и гравитационная массы различаются, то менее чем на  $1/10^{13}$  — одну десяти триллионную.



Рис. 1.4. Эксперимент с лифтом

Мысленный эксперимент, который привел Эйнштейна к принципу эквивалентности. Согласно этому принципу, лежащему в основе ОТО, явления, вызванные гравитационным полем Земли, и явления, обусловленные силами инерции вследствие ускоренного движения, тождественны и неразличимы.

Явление 1 на рисунке эквивалентно явлению 3, а явление 2 — явлению 4.

**2.** В ОТО принцип относительности (постулат СТО №1) можно понимать как:

**Все физические явления происходят одинаково во всех свободно падающих системах отсчета,**

т. е. в таких системах отсчета, в которых исключено влияние гравитационных полей или влияние неинерциальности системы отсчета.

**3.** В общей теории относительности принимается, что гравитационные эффекты обусловлены не силовым взаимодействием тел и полей, а деформацией (искривлением) самого пространства-времени, в котором они находятся (см. рис. 1.5). Эта деформация связана, в частности, с присутствием массы-энергии.

Источником гравитации (искривления пространства-времени) — является энергия. Если частица движется медленно, то ее энергия покоя  $E_0 = mc^2$ , заключенная в ее массе, намного превышает ее кинетическую энергию, и потому гравитационное взаимодействие частицы пропорционально ее массе. Но для достаточно быстрой частицы кинетическая энергия намного



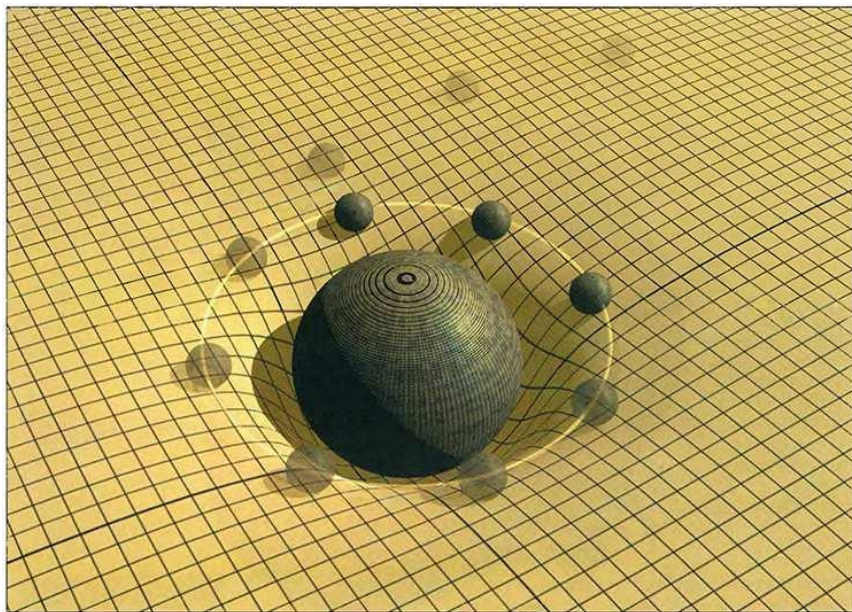


Рис. 1.5. Аналогия с резиновым листом

Большой шар в центре представляет массивное тело, например звезду. Под действием веса тела лист вблизи него искривляется. Шарик, катящийся по листу, отклоняется этой кривизной и движется вокруг большого шара, подобно тому как планеты в гравитационном поле звезды обращаются вокруг нее. Рисунок из книги С. Хокинга «Мир в ореховой скорлупке» (М.: Амфора, 2009).

больше массы. В этом случае ее гравитационное взаимодействие от массы практически не зависит и пропорционально кинетической энергии частицы.

### Математическая формулировка ОТО

Уравнения ОТО используют математический аппарат *дифференциальной геометрии* — раздела геометрии, в котором описываются свойства искривленного пространства<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>В ОТО пространство-время становится существенно *неевклидовым*, квадрат интервала между событиями  $s^2$  будет определяться более сложной формулой с использованием *метрического тензора* искривленного пространства-времени:

$$s^2 = \sum_{\mu, \nu=1}^4 g_{\mu\nu}(x) \Delta x^\mu \Delta x^\nu.$$

В уравнении Эйнштейна

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G_N}{c^4} T_{\mu\nu}$$

устанавливается связь свойств кривизны пространства-времени (их описывает *тензор Эйнштейна*  $G_{\mu\nu}$ ) с распределением материи (его описывает тензор энергии-импульса  $T_{\mu\nu}$ ); также в уравнение входят:  $g_{\mu\nu}$  — метрический тензор искривленного пространства-времени,  $\Lambda$  — *космологическая постоянная* и  $G_N$  — гравитационная постоянная Ньютона. Таким образом, уравнение Эйнштейна связывает геометрию пространства-времени (левая часть уравнения) с материей и ее движением (правая часть).

С математической точки зрения тензорное уравнение Эйнштейна — это система из 10 скалярных нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных.

### 1.3.2. Следствия ОТО

#### Некоторые эффекты ОТО, обнаруженные экспериментально:

1. Смещение перигелия Меркурия (*перигелий* — ближайшая к Солнцу точка орбиты).

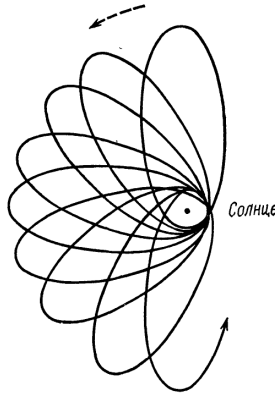


Рис. 1.6. Прецессирующая эллиптическая орбита

Рисунок из книги Н. Т. Роузвера «Перигелий Меркурия. От Лаверьё до Эйнштейна» (М.: Мир, 1985).

---

Здесь 4-вектор  $x^\mu$  обозначает пространственные координаты и время. Величины  $g_{\mu\nu}(x)$  называются *метрическим тензором*, и именно они являются динамическими переменными гравитационного поля, определяющими кривизну пространства-времени.

Еще в середине XIX в. французский астроном Леверье доказал, что движение Меркурия не подчиняется закону тяготения Ньютона — перигелий его орбиты дополнительно смещается на 43 угловые секунды в столетие. В процессе движения планеты орбита постепенно поворачивается (см. рис. 1.6). Эффект измеряется в течение десятилетий и в настоящее время полностью согласуется с предсказаниями ОТО.

**2.** Изменение частоты света в гравитационном поле. Частота света в гравитационном поле уменьшается — этот эффект еще называют *гравитационное красное смещение*.

**3.** Искривление лучей света вблизи массивных тел. Свет от далекой звезды отклоняется полем тяготения Солнца (см. рис. 1.7). Таким же образом искривляется свет от далеких звезд гравитационным полем галактик. Этот эффект получил название *гравитационное линзирование*.

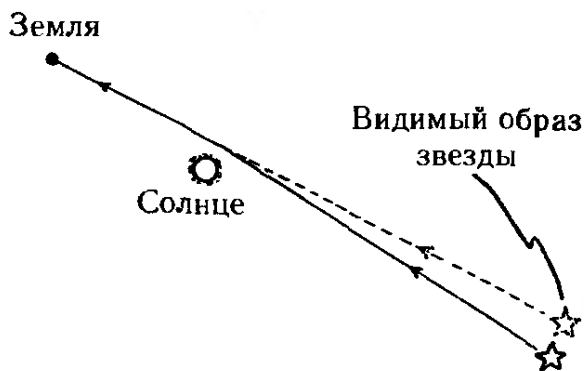


Рис. 1.7. Отклонение света от звезды в гравитационном поле Солнца

**4.** Замедление времени в гравитационном поле — явление, заключающееся в изменении темпа хода времени в гравитационном поле. Отметим, что и эффекты замедления времени, предсказываемые СТО, и гравитационное замедление времени учитываются в работе систем глобальной навигации GPS, ГЛОНАСС. Без такого учета точность позиционирования была бы существенно хуже (20–30 метров вместо 1–2 метров погрешности).

### Предсказания ОТО

**1.** В рамках ОТО предсказываются *гравитационные волны* — колебания геометрии пространства-времени. Эти волны могут возникать в различных астрофизических высокоэнергетических явлениях, таких как, например, слияние нейтронных звезд, или реликтовые гравитационные волны, по-

явившиеся в первые моменты после Большого Взрыва. В феврале 2016 г. появились данные о первом прямом наблюдении гравитационных волн.

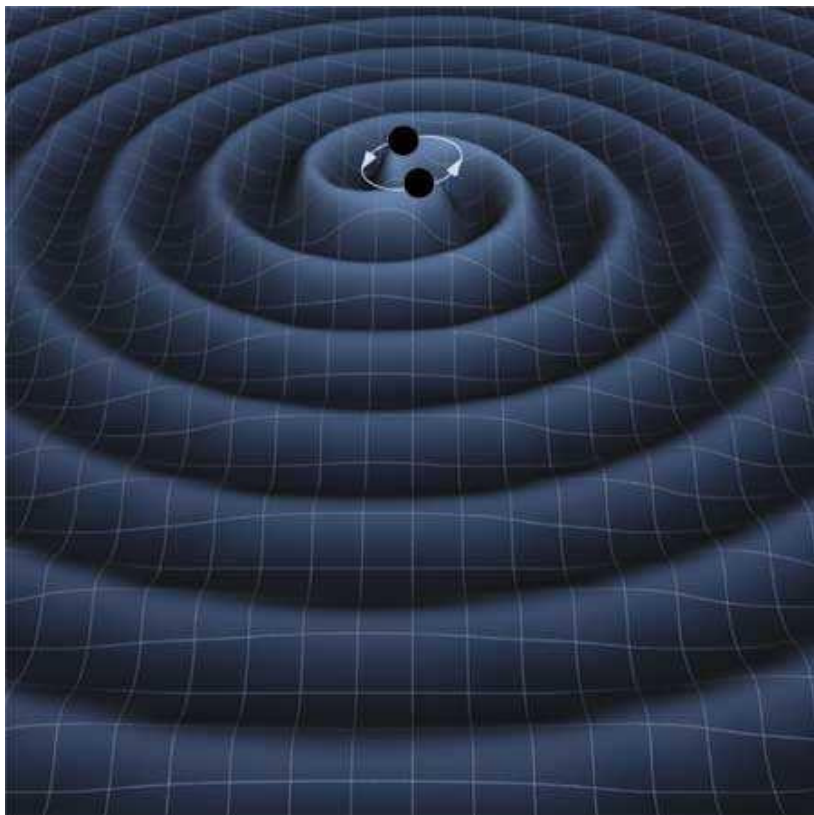


Рис. 1.8. Тесная пара черных дыр за мгновение до слияния  
Изображение с сайта [ligo.org](http://ligo.org), автор Т. Carnahan (NASA GSFC).

Из-за слабости гравитационного взаимодействия для возможности их наблюдения даже на сверхчувствительных гравитационных детекторах эти волны должны рождаться в каком-либо космическом катаклизме с колоссальным выделением энергии. Обсерватория LIGO зарегистрировала гравитационно-волновой всплеск, порожденный слиянием двух черных дыр с массами 29 и 36 солнечных масс в далекой галактике на расстоянии примерно 1,3 млрд световых лет. В этом слиянии огромная масса (около трех масс Солнца) перешла в энергию гравитационных волн (рис. 1.8).

2. Предсказывается существование черных дыр<sup>1</sup>. **Черная дыра** — область в пространстве-времени, гравитационное притяжение которой настолько велико, что покинуть ее не могут даже объекты, движущиеся со скоростью света, в том числе кванты самого света. Граница этой области называется *горизонтом событий*, а ее характерный размер — *гравитационным радиусом*  $r_g$ :

$$r_g = 2 \frac{G_N m}{c^2},$$

где  $m$  — масса объекта,  $G_N$  — гравитационная постоянная Ньютона,  $c$  — скорость света. Если по каким-то причинам массивный объект сжимается до размера своего гравитационного радиуса (для Солнца  $r_g \approx 3$  км, для Земли  $r_g \approx 1$  см), то происходит *гравитационный коллапс* — сжатие не останавливается, а продолжается до образования *сингулярности*, окруженной горизонтом событий. Находясь под горизонтом событий, любое тело будет двигаться только внутри черной дыры и не сможет вернуться обратно во внешнее пространство.

Существование черных дыр сейчас косвенно подтверждается астрофизическими наблюдениями.

\* \* \*

Теория гравитации (ОТО) успешно развивается, описывает все наблюдаемые явления гравитации, рождение и эволюцию звезд, галактик и Вселенной как целого.

Для классической теории гравитации существует предел применимости — *планковский масштаб*  $l_P \approx 1,6 \cdot 10^{-35}$  м. на расстояниях порядка планковского масштаба интенсивность гравитационного взаимодействия становится сравнима с интенсивностями других *фундаментальных взаимодействий*. Для описания физики на таких расстояниях необходимо использовать *квантовую теорию гравитации*, которая пока не создана.

---

<sup>1</sup>Подробнее см., например, [6–8].

## Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение инерциальной системы отсчета и сформулируйте принцип относительности Галилея.
2. Сформулируйте законы Ньютона.
3. Что Ньютон понимал под абсолютным пространством и абсолютным временем?
4. Укажите основные проблемы в физике XIX в., которые привели к созданию СТО.
5. Сформулируйте постулаты СТО и укажите основные следствия, вытекающие из них.
6. Сформулируйте принцип эквивалентности.
7. Какие наблюдательные данные могут служить подтверждением ОТО?

## Глава 2

# Элементарные частицы и фундаментальные взаимодействия

История поисков элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий насчитывает более двух с половиной тысяч лет и восходит к идеям древнегреческих философов о строении Мира.

Природа выглядит организованной иерархически: крупные тела состоят из более мелких, которые, в свою очередь, состоят из еще более мелких, и т. д. Впервые мысль о существовании мельчайших невидимых частиц (т. е. предела такого деления), из которых состоят все окружающие предметы, была высказана за 400 лет до нашей эры греческим философом Демокритом. Он назвал эти частицы атомами — неделимыми частицами.

Наука начала использовать представление об атомах только в начале XIX в., когда на основе атомизма удалось объяснить ряд физических и химических явлений. Позже были открыты электрон, атомное ядро — атом перестал быть неделимым. Дальнейшее углубление в структуру материи показало, что ядра состоят из протонов и нейтронов — *нуклонов*. А с увеличением экспериментальных возможностей выяснилось, что и внутри нуклона обнаруживаются новые частицы — *кварки и глюоны*<sup>1</sup>.

Будет ли эта история повторяться и дальше или же последние найденные частицы являются истинно элементарными? Кто знает...

### 2.1. Элементарные частицы и их классификация

В 1897 г. Джозеф Джон Томпсон (1856–1940), исследуя катодные лучи, открыл *электрон*  $e^-$  — первую *элементарную частицу*. Впоследствии были обнаружены многие сотни микрообъектов — целый «зоопарк элементарных частиц». Однако оказалось, что большинство из них являются не элементарными, а составными объектами.

---

<sup>1</sup>Подробнее о физике элементарных частиц см. [9, 10].

Поэтому, действительно элементарные частицы, а точнее, такие частицы, у которых не обнаружена внутренняя структура при современных экспериментальных возможностях, называют сейчас **фундаментальными частицами**.

Известные фундаментальные частицы можно разделить на три группы: *фундаментальные бозоны, лептоны и кварки*. Лептоны и кварки являются основными составляющими материи и вещества, бозоны же — кванты силовых полей, которые отвечают за передачу взаимодействий.

Кварки и лептоны выглядят точечными во всех экспериментах на современных ускорителях, т. е. если у них есть какой-то конечный размер, то он меньше чем  $10^{-19}$  м.

### Фундаментальные бозоны

Таблица 2.1. Свойства фундаментальных бозонов

	Название	Эл. заряд <sup>1</sup>	Масса <sup>2</sup>	Взаимодействие	Год открытия
$\gamma$	Фотон	0	0	Электромагнитное	1922
$W^{\pm}$	W-бозон	$\pm 1$	80,4 ГэВ	Слабое	1983
$Z^0$	Z-бозон	0	91,2 ГэВ	Слабое	1983
$g$	Глюон	0	0	Сильное	1979
$H$	Бозон Хиггса	0	125,1 ГэВ	<i>Возникновение инертной массы</i>	2012

### Лептоны

Лептоны участвуют в гравитационном, электрическом и слабом взаимодействиях. Слово «лептон» происходит от греческого «лептос», означающего маленький или легкий.

По каким-то причинам, пока неизвестным науке, существуют три группы фундаментальных частиц — *три поколения* лептонов, идентичных по всем характеристикам, кроме массы, например, мюон и тау-лептон — это просто более тяжелые копии электрона. Практически все физические процессы в обыденной жизни протекали бы так же, если бы второго и третьего поколений частиц не было вообще.

Кроме заряженных лептонов, есть лептоны с нулевым электрическим за-

<sup>1</sup>Электрический заряд приведен в единицах *элементарного заряда*  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

<sup>2</sup>В физике элементарных частиц удобно для измерения массы использовать энергетические единицы. Единицей энергии в физике элементарных частиц является электронвольт (эВ): энергию 1 эВ приобретает электрон, прошедший разность потенциалов 1 вольт.  $1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-13}$  Дж. Если вы хотите получить массу в килограммах, то по формуле  $E_0 = mc^2$  нужно значение энергии в джоулях поделить на квадрат скорости света  $c^2$ .



Таблица 2.2. Свойства лептонов

	Название	Эл. заряд	Масса	Год открытия
Первое поколение				
$\nu_e$	Электронное нейтрино	0	$\approx 0$	1956
$e^-$	Электрон	-1	0,511 МэВ	1897
Второе поколение				
$\nu_\mu$	Мюонное нейтрино	0	$\approx 0$	1962
$\mu^-$	Мюон	-1	105,6 МэВ	1936
Третье поколение				
$\nu_\tau$	Тау-нейтрино	0	$\approx 0$	2000
$\tau^-$	Тау-лептон	-1	1776,8 МэВ	1975

рядом — три сорта нейтрино. Первоначально нейтрино вошли в теорию как безмассовые частицы. Сейчас известно, что очень небольшая, но все-таки ненулевая масса у нейтрино есть. С наличием массы связаны *нейтринные осцилляции* — превращения нейтрино (электронного, мюонного или тауонного) в нейтрино другого сорта (поколения). Текущие экспериментальные ограничения на массы нейтрино составляют  $m_{\nu_e} < 2$  эВ,  $m_{\nu_\mu} < 0,17$  МэВ,  $m_{\nu_\tau} < 15,5$  МэВ. У нейтрино нет электрического заряда, следовательно, они участвуют только в слабом и гравитационном взаимодействиях, поэтому нейтрино исключительно слабо взаимодействуют с веществом. Так, длина свободного пробега нейтрино в свинце, т. е. средний путь отдельного нейтрино до взаимодействия с атомом свинца, составляет около 5 св. лет  $\approx 5 \cdot 10^{16}$  м.

### Кварки

Кварки, помимо гравитационного, электрического, слабого взаимодействий, участвуют также в сильном взаимодействии. Известно 6 сортов кварков. Условные названия кварков — Верхний, Нижний, Странный, Очарованный, Красивый, Истинный (англ. Up, Down, Strange, Charm, Beauty или Bottom, True или Top). Как и лептоны, кварки составляют три поколения.

Протоны и нейтроны (и все другие *адроны*) состоят из кварков. Можно легко написать *валентный состав* протона  $p = (uud)$  и нейтрона  $n = (udd)$  (см. рис. 2.1). Однако действительный кварковый состав протонов, нейтронов и других адронов — удивительная вещь, например, состав меняется в зависимости от того, с какого расстояния мы смотрим на протон (что соответствует тому, с какими энергиями мы проводим эксперимент). При небольших энергиях ( $E \lesssim 1$  ГэВ) протон выглядит как элементарная,

Таблица 2.3. Свойства кварков

	Название	Эл. заряд	Масса	Год открытия
Первое поколение				
$u$	u-кварк	$+2/3$	2,0 МэВ	1968
$d$	d-кварк	$-1/3$	4,8 МэВ	1968
Второе поколение				
$c$	c-кварк	$+2/3$	1290 МэВ	1974
$s$	s-кварк	$-1/3$	95 МэВ	1968
Третье поколение				
$t$	t-кварк	$+2/3$	173340 МэВ	1995
$b$	b-кварк	$-1/3$	4180 МэВ	1977

бесструктурная частица, при увеличении энергии проявляется составная структура протона: три компактных объекта — кварка, далее, в зависимости от энергии взаимодействия, будут обнаруживаться в протоне новые объекты — кварки всех трех поколений и глюоны.

Каждый кварк имеет один из трех *цветовых зарядов* — условно их называют красный, зеленый и синий, хотя эти «цвета» и не имеют отношения к обычным видимым цветам, но в правилах взаимодействия кварков есть некоторая аналогия тому, как смешивается свет разных цветов. Например, смешав зеленый и красный свет, мы получим желтый; а смешав все три основных цвета — белый.

Необычные свойства сильного взаимодействия приводят к тому, что одиночный кварк не может удалиться на какое-либо существенное расстояние от других кварков, а значит, кварки не могут наблюдаться в свободном виде (явление, получившее название *конфайнмент* — от английского «пленение», «тюремное заключение»). Наблюдаться могут лишь «бесцветные» комбинации кварков — **адроны**<sup>1</sup>, состоящие из двух (*мезоны*) или трех (*барионы*) кварков, а в последнее время появились экспериментальные свидетельства существования короткоживущих адронов, состоящих из четырех и пяти кварков — тетракварков и пентакварков. Такие экзотические состояния

<sup>1</sup>В 1962 г. Л. Б. Окунь предложил название адрон для любой внешне элементарной частицы, которая, подобно протону (но не электрону и всем другим лептонам), принимает участие в сильном взаимодействии. Слово «адрон» происходит от греческого «адрос», означающего толстый, тяжелый. Сейчас адроном называют любую частицу, составленную из кварков.

не запрещены теорией, но почему-то кварки в основном «предпочитают» образовывать комбинации из двух или трех частиц.

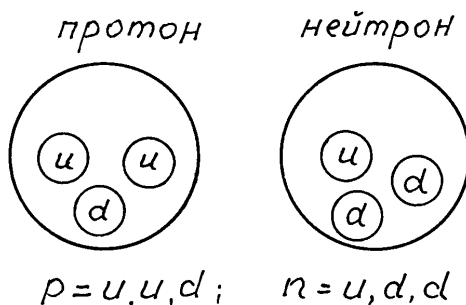


Рис. 2.1. Валентный кварковый состав нуклонов

Один кварк не может существовать сам по себе, в свободном состоянии, потому что тогда он должен был бы иметь цвет. Глюонные силы, связывающие кварки в протоне, не ослабевают при удалении одного кварка от другого. В результате при попытке «вырвать» кварк из протона глюонное поле порождает дополнительную кварк-антикварковую пару и от протона уже отделяется не кварк, а  $\pi$ -мезон. Отдельный  $\pi$ -мезон уже может улететь сколь угодно далеко от протона, потому что силы притяжения между адронами ослабевают с расстоянием. В результате кварку все же удается «сбежать» из протона, но не в свободном виде, а в паре с антикварком, уже в виде мезона. Подобные процессы называются *адронизацией* (см. рис. 2.2).

**Именно адроны и лептоны образуют вещество — атомы состоят из нуклонов (протонов и нейтронов) и электронов.**

Для каждой из вышеупомянутых частиц есть «двойник» — частица с такой же массой, но с противоположными характеристиками взаимодействия, такими как электрический заряд, цветовой заряд и др. Эти двойники называются **античастицами**. Позитрон — античастица электрона, для остальных название образуется добавлением приставки анти: электронное антинейтрино, антимюон, анти  $u$ -кварк и т. д.

Может существовать антивещество — это вещество, в котором все частицы заменены на античастицы; атомы антивещества состоят из антипротонов, антинейтронов и позитронов. В случае когда сталкиваются частица и ее античастица, происходит *аннигиляция* — исходные частицы уничтожаются

и рождаются новые частицы, при этом часть массы исходной пары может перейти в энергию<sup>1</sup>.

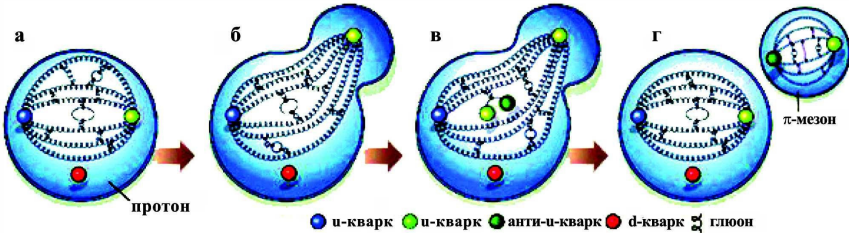


Рис. 2.2.

Поэтапная иллюстрация образования  $\pi$ -мезона — процесса адронизации  
Рисунок с сайта [www.nature.com](http://www.nature.com).

### Спин

Все элементарные частицы одного сорта являются *тождественными*, невозможно отличить, например, один электрон от другого. В этом состоит одна из наиболее важных симметрий в природе — неразличимость частиц одного сорта. Динамика любой системы должна быть инвариантной относительно замены одной из частиц на другую того же сорта. Однако есть два совершенно разных типа поведения систем с тождественными частицами. То, к какому типу относится данный сорт частиц, определяется *спином* этих частиц.

**Спин частицы** — собственный механический момент количества движения частицы, квантовое число, неотъемлемое свойство частицы.

Спин измеряется в единицах постоянной Планка  $\hbar$  и может быть целым  $S = 0, \hbar, 2\hbar \dots$  или полуцелым  $S = \frac{1}{2}\hbar, \frac{3}{2}\hbar \dots$ . (Частицы со спином  $S = 0$  называются *скалярными*,  $S = 1/2\hbar$  — *спинорными*,  $S = 1\hbar$  — *векторными*,  $S = 2\hbar$  — *тензорными*.)

Вот как раскрывает понятие спина Стивен Хокинг [11, с. 58]:

«Представим себе частицы в виде маленьких волчков, вращающихся вокруг своей оси. Правда, такая картина может ввести в заблуждение, потому что в квантовой механике частицы не имеют вполне определенной оси вращения. на самом деле спин частицы дает нам сведения о том, как выглядит эта частица, если смотреть на нее с разных сторон. Частица со спином 0 похожа на точку: она выглядит со всех

<sup>1</sup>В реакциях деления или синтеза ядер выделяется в виде кинетической энергии всего примерно 0,01 — 0,2% массы, а в реакциях аннигиляции может выделяться в виде энергии вплоть до 50 процентов массы.

сторон одинаково (рис. 2.3, I). Частицу со спином 1 можно сравнить со стрелой: с разных сторон она выглядит по-разному (рис. 2.3, II) и принимает тот же вид лишь после полного оборота на  $360^\circ$ . Частицу со спином 2 можно сравнить со стрелой, заточенной с обеих сторон: любое ее положение повторяется после полуоборота ( $180^\circ$ , рис. 2.3, III). Аналогичным образом частица с более высоким спином возвращается в первоначальное состояние при повороте на еще меньшую часть полного оборота. Это все довольно очевидно, а удивительно другое — существуют частицы, которые после полного оборота не принимают прежний вид: их нужно дважды полностью повернуть ( $720^\circ$ )! Говорят, что такие частицы обладают спином  $1/2$ ».

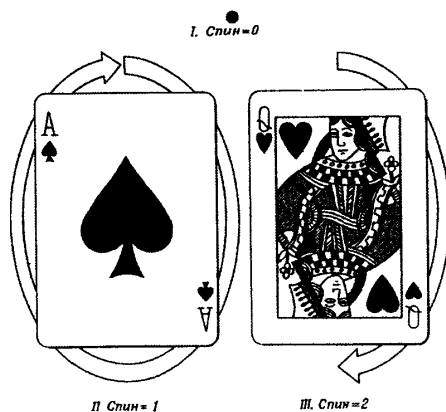


Рис. 2.3. Образное представление спина

Рисунок из книги С. Хокинга «Краткая история времени: от большого взрыва до черных дыр» (Амфора, 2003).

В случае целого спина частицы подчиняются *статистике Бозе–Эйнштейна* и называются **бозонами** — это фотон,  $W^\pm$ -бозоны,  $Z$ -бозон, глюоны (переносчики фундаментальных взаимодействий); бозон Хиггса, а также мезоны, ядра гелия-4 и др.

В случае полуцелого спина частицы описываются *статистикой Ферми–Дирака* и называются **фермионами** — это лептоны, кварки, протоны, нейтроны, барионы и др.

Фермионы — индивидуалисты, «каждому из них нужна отдельная квартира» [10]: в данном состоянии может находиться не более одного фермиона — *принцип запрета Паули*. Именно этим объясняется то, что электроны в атомах не сидят все на самом нижнем энергетическом уровне, а по мере

роста заряда ядра заполняют все более далекие от ядра оболочки, формируя таким образом таблицу Менделеева.

Бозоны — коллективисты, «они стремятся все жить в одной комнате». Бозоны все стремятся попасть в одно и то же квантовое состояние. На этом свойстве фотонов основан лазер: все фотоны в лазерном пучке имеют строго одинаковые импульсы.

Другой важной характеристикой элементарных частиц является их **время жизни**. По времени жизни элементарные частицы разделяются на:

*стабильные* (распад не обнаружен) — протон, электрон и их античастицы, фотон;

*долгоживущие* — нейтрон со временем жизни  $T_n \approx 880$  с,  $\pi^-$  и  $\pi^+$  мезоны  $T_{\pi^\pm} \approx 2,6 \cdot 10^{-8}$  с, мюон  $T_\mu \approx 2,2 \cdot 10^{-6}$  с, гипероны, каоны. Относительно долгое время жизни этих частиц объясняется, тем что они распадаются за счет слабого взаимодействия;

*короткоживущие* — все остальные барионы, мезоны и др., распады которых обусловлены электромагнитным или сильным взаимодействиями, характерное время жизни  $T \sim 10^{-13} - 10^{-25}$  с.

## 2.2. Фундаментальные взаимодействия

По современным экспериментальным данным все многообразие наблюдаемых природных явлений сводится к четырем типам взаимодействий элементарных частиц. Эти взаимодействия называются **фундаментальными**.

### 2.2.1. Гравитационное взаимодействие

Гравитация<sup>1</sup> (от латинского слова «gravitas» — тяжесть) — притяжение между двумя любыми массивными телами, а с учетом эквивалентности массы и энергии и между любыми имеющими энергию объектами.

Силу гравитационного взаимодействия можно оценить, если сравнить силу электрического отталкивания двух электронов и силу их гравитационного притяжения. Окажется, что отталкивание за счет электрических сил в  $10^{43}$  раз больше, т. е. гравитационное взаимодействие очень слабое. Однако из-за того, что не бывает «отрицательных» масс, каждая частица испытывает притяжение ко всем остальным. Поэтому самое слабое из всех фундаментальных взаимодействий, гравитация оказывает определяющее влияние на рождение и эволюцию самых больших объектов — планет, звезд, галактик и Вселенной в целом.

<sup>1</sup>Подробнее о гравитации и ее роли в космологии см. [12].

Общая теория относительности (ОТО) — классическая теория гравитации. Несмотря на более чем полувековую историю попыток квантования, гравитация — единственное из фундаментальных взаимодействий, для которого пока еще не построена квантовая теория. Квантованное гравитационное взаимодействие можно представить как обмен *гравитонами* — гипотетическими калибровочными бозонами со спином 2; но получающаяся при этом теория приводит к противоречиям, оказывается *неперенормируемой* и поэтому считается неудовлетворительной. Одним из кандидатов на объяснение квантовой природы гравитации является *теория струн*, которая рассматривает элементарные частицы как протяженные объекты, подобные струнам. Однако построению последовательной теории в этом подходе мешают пока непреодолимые математические и концептуальные трудности (подробнее о теории струн см. [13, 14]).

### 2.2.2. Электромагнитное взаимодействие

Электромагнитное взаимодействие существует между частицами, обладающими электрическим зарядом.

В XIX в. открыли, что электрические и магнитные силы — это два различных проявления одной и той же электромагнитной силы. Классическая теория электромагнетизма — *электродинамика* — создана в 1873 г. Джеймсом Максвеллом (1831–1879). Уравнения Максвелла предсказывают существование электромагнитных волн, т. е. электромагнитное взаимодействие ответственно и за все оптические явления — испускание, преобразование и поглощение света.

После создания квантовой механики появилась необходимость распространения ее принципов на законы электродинамики. Последовательное квантовомеханическое описание физических полей дается в квантовой теории поля.

**Квантовая теория поля** — теория, объединяющая идеи специальной теории относительности и квантовой механики, описывающая поле как квантовую систему с бесконечно большим числом степеней свободы, а все частицы рассматриваются как возбуждения в квантовых полях.

В 1927 г. Поль Дирак (1902–1984) создал первую теорию квантового поля, которая объясняла и электромагнитное поле, и электроны как квантовомеханические объекты.

С точки зрения квантовой теории поля электромагнитное взаимодействие переносится безмассовым бозоном — фотоном  $\gamma$ . Сам фотон электрическим зарядом не обладает, а значит, не взаимодействует непосредственно с другими фотонами. Нулевая масса фотона приводит к электрическим силам,

обратно пропорциональным квадрату расстояния ( $F \sim \frac{1}{r^2}$ ) и бесконечному радиусу взаимодействия — заряженные тела взаимодействуют на любых расстояниях.

Теория Дирака воспроизвела все полученные ранее результаты, касавшиеся излучения и поглощения света атомами, а также предсказала существование позитрона как античастицы электрона. Но попытки произвести вычисления с большей точностью натолкнулись на трудности: в вычислениях возникали бесконечности, что не могло согласовываться с опытом.

Уже в 1940-х гг. Р. Фейнман, Дж. Швингер и С. Томонага смогли решить эту проблему, предложив процедуру *перенормировки* — пересмотра связи между наблюдаемыми величинами и параметрами в уравнениях теории. За создание квантовой теории электромагнитного взаимодействия — *квантовой электродинамики (КЭД)* — первой последовательной квантовой теории поля, Р. Фейнман, С. Томонага, Дж. Швингер получили в 1965 г. Нобелевскую премию.

Квантовая теория поля использует весьма сложный математический аппарат, далекий от наглядности. Однако в ней возник язык условных рисунков — **фейнмановские диаграммы**, который существенно упрощает понимание многих аспектов квантовой теории поля. Предложенные в 1949 г. Ричардом Фейнманом (1918–1988) эти диаграммы наглядно описывают взаимодействия частиц. На рис. 2.4 приведена простейшая диаграмма Фейнмана, описывающая взаимодействие электрона и протона (притяжение) путем обмена фотоном.

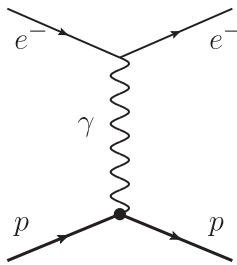


Рис. 2.4. Взаимодействие электрона  $e$  и протона  $p$  путем обмена фотоном  $\gamma$ . Стрелки указывают направление течения времени для каждой частицы.

Каждому процессу отвечает одна или несколько диаграмм Фейнмана. Внешним линиям на диаграмме соответствуют входящие (до взаимодействия) и выходящие (после взаимодействия) частицы, которые свободны. Их называют *реальными частицами*, у таких частиц энергия, масса и импульс



связаны:

$$\left(\frac{E}{c}\right)^2 - \vec{p}^2 = m^2 c^2.$$

Внутренние линии диаграмм соответствуют частицам, находящимся в виртуальном состоянии, — *виртуальным частицам*. О них говорят, что они находятся вне массовой поверхности, для таких частиц  $\left(\frac{E}{c}\right)^2 - \vec{p}^2 \neq m^2 c^2$ . Распространение виртуальной частицы описывается математической величиной, которую называют *пропагатором*.

Эта общепринятая терминология может натолкнуть на мысль, что виртуальные частицы менее материальны, чем реальные частицы. В действительности же они в равной степени материальны, но реальные частицы мы воспринимаем как вещество и излучение, а виртуальные — в основном как силовые поля, хотя и это различие в значительной степени условно. Важно, что одна и та же частица, например фотон или электрон, может быть реальной в одних условиях и виртуальной — в других.

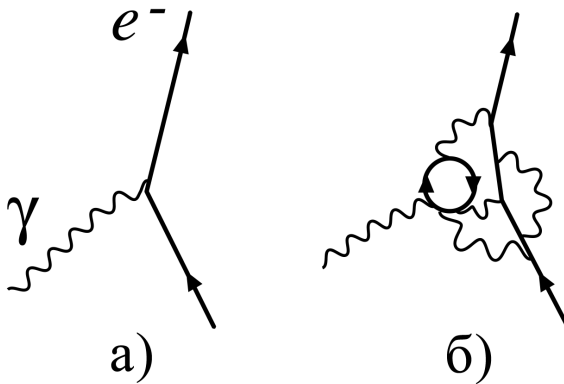


Рис. 2.5. а) Диаграмма вершины взаимодействия электрона с фотоном; б) Одна из многих диаграмм для той же вершины с учетом поправок

*Вершины* диаграммы описывают локальные акты элементарных взаимодействий между частицами. В каждой вершине 4-импульс и другие квантовые числа сохраняются. Все электромагнитные взаимодействия сводятся к определенной последовательности элементарных процессов, в которых в одной точке (вершине) сходятся три линии (см. рис. 2.5).

**Две реальные частицы взаимодействуют на расстоянии, обмениваясь одной или несколькими виртуальными частицами.**

О реальных частицах говорят, что они движутся, о виртуальных — что они распространяются (propagate). Термин «распространение» указывает

на то обстоятельство, что у виртуальной частицы может быть бесконечное количество траекторий и по ним частица «движется» одновременно.

Замечательным свойством фейнмановских диаграмм является то, что они единым образом описывают как частицы, так и соответствующие античастицы. При этом античастица выглядит как частица, движущаяся вспять по времени. на рис. 2.6 приведена диаграмма, изображающая рождение протона и антипротона при аннигиляции электрона и позитрона. Диаграммы Фейнмана используются в описании и других фундаментальных взаимодействий.

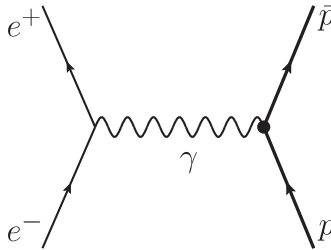


Рис. 2.6. Рождение протона  $p$  и антипротона  $\bar{p}$  при аннигиляции электрона  $e^-$  и позитрона  $e^+$

Электромагнитное взаимодействие заметно проявляется как на макроскопическом, так и на микроскопическом уровнях. Подавляющее большинство физических сил: силы упругости, силы трения, силы поверхностного натяжения и т. д. — имеют электромагнитную природу.

Электромагнитное взаимодействие практически полностью определяет физические свойства макроскопических тел. Оно же лежит в основе химических превращений. Электрические, магнитные и оптические явления также сводятся к электромагнитному взаимодействию. Основа жизни — биохимические процессы — имеют электромагнитное происхождение.

Электромагнитное взаимодействие заряженных частиц намного сильнее гравитационного, и единственная причина, по которой электромагнитное взаимодействие не проявляется в космических масштабах, — электрическая нейтральность материи, т. е. наличие в каждой области Вселенной с высокой степенью точности равных количеств положительных и отрицательных зарядов.

Подробнее о классической электродинамике рассказывается, например, в книге [15], о роли электричества в живых организмах — [16], о квантовой электродинамике — [17].

### 2.2.3. Слабое взаимодействие

В слабом взаимодействии участвуют все фундаментальные фермионы (лептоны и кварки). Оно ответственно, в частности, за распад нейтрона и других долгоживущих частиц, за  $\beta$ -радиоактивность. Это взаимодействие называется слабым, поскольку сильное и электромагнитное взаимодействия, значимые для ядерной физики, характеризуются большей интенсивностью. Однако оно значительно сильнее гравитационного взаимодействия.

*Электрослабая теория* описывает слабое взаимодействие в рамках квантовой теории. Оказалось, что электромагнитное и слабое взаимодействия, существенно разные при малых энергиях, объединяются и становятся единым электрослабым взаимодействием при энергиях больше 100 ГэВ. Если бы имела место строгая электрослабая симметрия при любых энергиях, то массы  $W^{\pm}$ - и  $Z$ -бозонов были бы равны нулю, как равняется нулю масса фотона. За вклад в объединение слабого и электромагнитного взаимодействий элементарных частиц Шелдону Глэшу, Стивену Вайнбергу и Абдусу Саламу была присуждена Нобелевская премия по физике за 1979 г.

Переносчиками слабого взаимодействия являются векторные бозоны  $W^{\pm}$  и  $Z^0$ . Поскольку эти переносчики массивны, то слабое взаимодействие является *короткодействующим* — оно проявляется на расстояниях, значительно меньших размера атомного ядра (характерный радиус взаимодействия  $10^{-17}$  м), а его интенсивность быстро спадает после расстояний, соответствующих массам бозонов.

Несмотря на малый радиус действия и относительную малость, слабое взаимодействие имеет важное значение для целого ряда природных процессов. в частности, именно слабым взаимодействием обусловлено протекание *термоядерной реакции*, являющейся основным источником энергии большинства звезд, включая Солнце, — реакции синтеза гелия-4 из четырех протонов с испусканием двух позитронов и двух нейтрино ( $4p \rightarrow \dots \rightarrow \frac{4}{2}He + 2e^+ + 2\nu_e + Q$ ).

### 2.2.4. Сильное взаимодействие

Сильное взаимодействие *короткодействующее* — действует в масштабах порядка размера атомного ядра и менее ( $r < 10^{-15}$  м), отвечая за исключительно сильную связь между кварками в адронах и за притяжение между нуклонами в ядрах. В сильном взаимодействии участвуют обладающие цветовым зарядом кварки и глюоны и составленные из них частицы, называемые адронами.

Квантовая теория сильных взаимодействий называется *квантовой хромодинамикой* (КХД).

Глюоны — частицы, осуществляющие взаимодействие между кварками, сами обладают цветом и, следовательно, переносят его, изменяя цвет (но не сорт) кварка. Например, «красный» кварк во время подобного взаимодействия превращается в «зеленый». В этом проявляется коренное отличие квантовой хромодинамики от квантовой электродинамики, в которой частицы — переносчики взаимодействия (фотоны) — электронейтральны и, следовательно, не изменяют характеристику электрического заряда — его знак. Наличие цвета у глюонов приводит к взаимодействию между ними и, следовательно, к кардинальному различию уравнений квантовой электродинамики и квантовой хромодинамики. Электромагнитные уравнения линейные, а уравнения квантовой хромодинамики принципиально нелинейные. Последнее обстоятельство существенно усложняет их решение. В частности, проблема теоретического описания невыедания кварков — конфайнмента (о которой говорилось выше) — связана с нелинейностью уравнений квантовой хромодинамики, описывающих взаимодействие кварков.

\* \* \*

Главным результатом современной физики элементарных частиц является построение *Стандартной модели* фундаментальных взаимодействий кварков и лептонов — основных «кирпичиков» мироздания. За последние годы ее предсказания были многократно проверены в экспериментах, и в настоящее время она — единственная физическая теория, адекватно описывающая устройство нашего мира. В следующей главе будут подробнее рассмотрены основные принципы, лежащие в основе Стандартной модели.

### Вопросы для самоконтроля

1. Назовите известные в настоящее время фундаментальные частицы.
2. Какие частицы называют лептонами? Адронами? Приведите примеры.
3. Что такое спин частицы? Какая классификация элементарных частиц по спину является сейчас общепринятой?
4. Сформулируйте принцип запрета Паули.
5. Назовите известные сейчас фундаментальные взаимодействия.

## Глава 3

# Симметрия в фундаментальной физике

Симметрия всегда привлекала внимание человека. С ней тесно связаны понятия красоты, соразмерности и порядка.

В течение XX в., с развитием квантовой механики и квантовой теории поля как теоретического способа описания фундаментальной физики элементарных частиц высшую роль приобрело понятие *симметрии* и в физике. Оказалось, что с симметриями связаны *законы сохранения*. Благодаря глубокому пониманию симметрий, управляющих динамикой фундаментальных взаимодействий, возникла *Стандартная модель* взаимодействий элементарных частиц.

### 3.1. Симметрии и законы сохранения

Симметрия в природе проявляется в неизменности каких-либо свойств, параметров систем при преобразованиях в самих системах, способах наблюдения, системах отсчета и др. (см. рис. 3.1–3.3) Так, например, сферическая симметрия тела означает, что вид тела не изменится, если его вращать в пространстве на произвольные углы. Двусторонняя симметрия означает, что правая и левая стороны относительно какой-либо плоскости выглядят одинаково<sup>1</sup>.

В различных симметриях проявляются глубокие внутренние свойства физических систем. В современной физике именно исследование симметрий оказывается «путеводной звездой» для все более полного понимания структуры материи и закономерностей ее движения.

Если какую-либо систему повернуть или сдвинуть, поменять части местами, заменить одни частицы на другие или совершить любое другое *преобразование*, то может оказаться, что некоторые параметры системы остались неизменными. Такие параметры называют *инвариантами* и говорят, что сама система обладает *симметрией* относительно этих преобразований.

---

<sup>1</sup>Подробнее о симметрии и ее роли в физике см. [18–20].

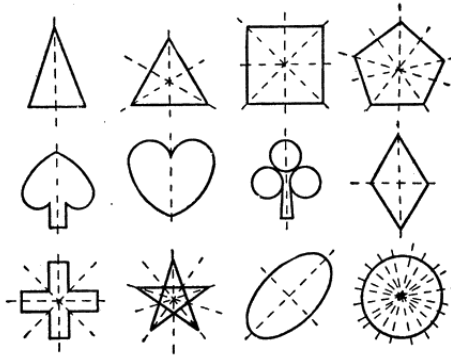


Рис. 3.1. Симметрия геометрических фигур

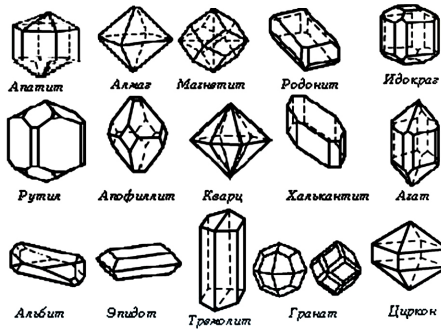


Рис. 3.2. Симметрия кристаллов

Рассмотрим несколько особенно важных для фундаментальной физики типов симметрии.

**1. Непрерывные симметрии** — преобразования в этих симметриях характеризуются непрерывно меняющимися параметрами, например непрерывно может меняться угол поворота:

**а)** симметрия относительно сдвига системы координат на некоторый вектор  $\vec{a}$ :

$$\vec{r} \rightarrow \vec{r}' = \vec{r} + \vec{a}.$$

Такой симметрией обладают, например, кристаллы. Но более важно, что такая симметрия есть у пространства: пустое пространство однородно и его свойства не меняются от точки к точке. Эта симметрия приводит к

**закону сохранения импульса:**  $\vec{p} = const$ ;

**б)** симметрия относительно сдвига начала отсчета времени:

$$t \rightarrow t' = t + t_0.$$

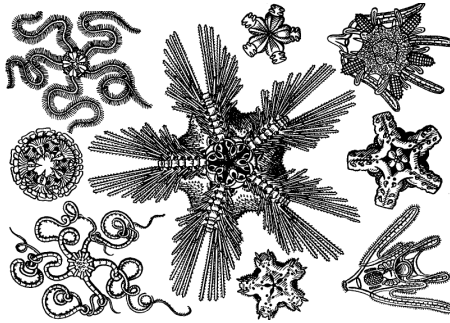


Рис. 3.3. Симметрия в живой природе. Иглокожие офиуры  
Рисунок из книги Г. Вейля «Симметрия» (М.: Наука, 1968).

Эта симметрия — однородность времени — приводит к

закону сохранения энергии:  $E = const$ ;

**в)** симметрия относительно поворота системы координат на некоторый угол, характеризуемый вектором  $\vec{\alpha}$ :

$$r_i \rightarrow r'_i = C_{ij}(\vec{\alpha})r_j,$$

здесь каждая координата вектора  $\vec{r}$  преобразуется с помощью *матрицы поворота*  $C_{ij}(\vec{\alpha})$ , зависящей от вектора поворота  $\vec{\alpha}$ . Изотропность пространства — равноправие всех направлений в пространстве, и, следовательно, симметрия относительно поворотов приводит к

закону сохранения момента импульса:  $\vec{L} = const$ .

**2. Дискретные симметрии** — симметрии относительно операций, которые невозможно проводить непрерывно, например зеркальное отражение или поворот на фиксированный угол (симметрия морской звезды — симметрия относительно поворота на угол  $72^\circ$ ). Из дискретных симметрий особую роль в фундаментальной физике имеют:

**а) зарядовое сопряжение  $\mathbf{C}$**  — замена в некоторой системе всех частиц на античастицы, например в атоме водорода замена протона на антипротон, электрона на позитрон;

**б) пространственная инверсия  $\mathbf{P}$**  — замена всех координат на противоположные (инверсия относительно начала координат):

$$\vec{r} \rightarrow \vec{r}' = -\vec{r};$$

**в) изменение направления времени  $T$**  — «кино наоборот», эволюция системы рассматривается в обратном направлении:

$$t \rightarrow t' = -t.$$

Законы Ньютона (и классическая физика) инвариантны относительно любой комбинации из  $C$ -,  $P$ -,  $T$ -преобразований. Например, если в системе из зарядов  $+q$  и  $-q$  поменять их местами (произвести зарядовое сопряжение  $C$ ), результат взаимодействия — притяжение зарядов и соответствующее их движение — не изменится.

Особую же значимость эти преобразования получили с развитием квантовой теории поля. До 1956 г. физики считали эти три дискретные симметрии такими же незыблемыми, как и однородность и изотропию пространства и однородность времени. Однако некоторые странности в распадах мезонов навели на подозрение, что это не так, а в результате специально поставленных опытов вскоре было обнаружено, что во всех слабых процессах  $C$ -,  $P$ - и  $T$ -симметрии нарушаются максимально возможным образом. Позднее было найдено, что любая квантовая теория поля должна быть инвариантна относительно  $CPT$ -преобразования (теорема Людерса-Паули), что накладывает жесткие ограничения на возможные расширения теории. В частности, в силу  $CPT$ -теоремы доказывается строгое соответствие между веществом и антивеществом: у частицы и античастицы точно равны массы, а их электрические заряды равны по модулю и противоположны по знаку.

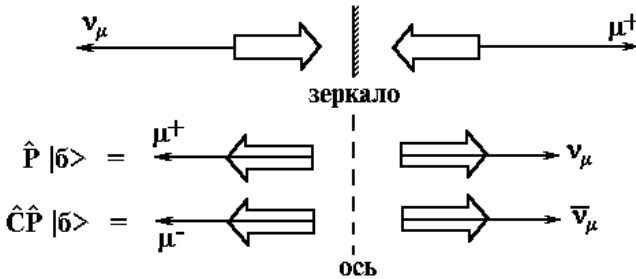


Рис. 3.4. Действие  $P$ - и  $CP$ - преобразований на состояние распада  $\pi^+$ -мезона. Преобразование  $P$  меняет направления вылета антимюона  $\mu^+$  и мюонного нейтрино  $\nu_\mu$ , а преобразование  $CP$ , в добавление к инверсии  $P$ , меняет частицы на античастицы, антимюон  $\mu^+$  заменяется на мюон  $\mu^-$ , а нейтрино на антинейтрино  $\bar{\nu}_\mu$ .

**3. Внутренние или калибровочные симметрии** — симметрии, характеризующие свойства полей, частиц, не связанные с преобразованием пространственных координат, как, например, цветовая симметрия кварков. Оказалось, что именно такие симметрии позволяют понять структуру фундаментальных взаимодействий.



Приведем некоторые примеры таких симметрий:

**а) калибровочная симметрия электродинамики** — симметрия относительно преобразования потенциала электромагнитного поля. Эта симметрия приводит к закону сохранения электрического заряда;

**б) изотопическая симметрия** — в сильных внутриядерных взаимодействиях нуклоны (протон и нейтрон) проявляют одинаковые свойства, т. е. для сильных взаимодействий эти частицы почти тождественны;

**в) цветовая симметрия** кварков — динамика взаимодействий кварков (КХД) оказывается инвариантна относительно преобразований кварковых состояний в цветовом пространстве;

**г) гипотетическая кварк-лептонная или четырехцветовая симметрия** — предположение о существовании симметрии между кварками и лептонами, в ней лептоны описываются как кварки четвертого цвета;

**д) гипотетическая суперсимметрия** — симметрия, связывающая бозоны и фермионы, т. е. частицы с целым и полуцелым спином, в природе. Преобразование суперсимметрии связывает бозонное и фермионное квантовые поля, так что они могут превращаться друг в друга. Образно можно сказать, что преобразование суперсимметрии может переводить вещество во взаимодействие (или в излучение), и наоборот. Для каждой известной частицы появляется новая частица — *суперпартнер*: бозон для фермиона, фермион для бозона. Экспериментальный поиск суперпартнеров обычных частиц — одна из задач современной физики высоких энергий.

Существуют и многие другие теоретические конструкции, включающие как основной элемент различные симметрии.

### 3.1.1. Связь симметрий и законов сохранения

Законы сохранения фундаментальны для нашего понимания физического мира, в котором они описывают, какие процессы в природе могут происходить, а какие нет. Например, закон сохранения энергии устанавливает, что полное количество энергии в изолированной системе не изменяется, хотя энергия может переходить из одной формы в другую.

Общую связь между симметриями и законами сохранения устанавливает **теорема Нётер**<sup>1</sup>:

каждой непрерывной симметрии физической системы соответствует закон сохранения.

Однородности времени соответствует закон сохранения энергии, однородности пространства — закон сохранения импульса, изотропии простран-

<sup>1</sup>Амалия Эмми Нётер (1882–1935) — немецкий математик, по словам Эйнштейна, Вейля, Александрова, Винера и др., — «самая выдающаяся женщина-математик, когда-либо существовавшая».

ства — закон сохранения момента импульса, калибровочной симметрии — закон сохранения электрического заряда и т. д.

Что касается дискретных симметрий, то в классической механике они не приводят к каким-либо законам сохранения. Однако в квантовой механике из существования дискретных симметрий следуют законы сохранения некоторых специфических величин, не имеющих аналогов в классической механике, например *P-четность* (*пространственная четность*), сохранение которой вытекает из симметрии относительно пространственной инверсии, *CP-четность* и др.

### 3.2. Стандартная модель взаимодействий элементарных частиц

Путь развития физики — поиск общих законов для различных явлений. Вот как об этом писал Аркадий Мигдал [18, с. 123]:

*«Главное направление, по которому развивалась физика, — поиски единых причин для явлений разного круга, попытки объединения различных областей физической науки.*

*Важный шаг на этом пути был сделан Ньютоном. Он доказал, что падение тел на Земле, движение Луны вокруг Земли и движение звезд определяются одной причиной — притяжением с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния. Он показал, что все эти явления можно количественно рассчитать с помощью сформулированных им законов механики.*

*Следующий, не менее грандиозный шаг сделал Джеймс Максвелл. Он получил удивительные уравнения, объединившие все явления электричества, магнетизма и оптики. Замечательный немецкий физик, один из создателей статистической физики — Людвиг Больцман сказал об уравнениях Максвелла: „Не боги ли начертали эти письма?“*

*В начале XX века физики знали только два типа взаимодействий — электромагнитное и гравитационное. Затем открыли слабое и сильное взаимодействия. Казалось, что между четырьмя взаимодействиями — сильным, слабым, гравитационным и электромагнитным — не существует никакой связи. В последние десятилетия усилия физиков были направлены на их объединение. Электромагнитное и слабое взаимодействия объединяются в электрослабое.*

*В чем красота такого объединения? Возникли неожиданные связи между разнородными явлениями. Так, постоянная, определявшая величину слабого взаимодействия, оказалась связанной с зарядом электрона. Теория объяснила многие явления, казавшиеся ранее загадочными.*

*Плодотворная тенденция теории элементарных частиц состоит в предположении, что на сверхмалых расстояниях существует максимальная симметрия, но при переходе к большим расстояниям (малым энергиям) возникает спонтанное нарушение, которое может сильно замаскировать первоначальную симметрию».*

На пути объединения фундаментальных взаимодействий и поиска новых симметрий в 1960–1970 гг. была создана **Стандартная модель** взаимодействий элементарных частиц, единым образом описавшая электромагнитное, сильное и слабое взаимодействия.

Основой, на которой строится Стандартная модель, является описание калибровочных симметрий фундаментальных взаимодействий.

Математической структурой, выражающей преобразования симметрии, является **группа**<sup>1</sup>. Общая группа калибровочных симметрий Стандартной модели дается выражением

$$G_{\text{SM}} = SU_c(3) \otimes SU_L(2) \otimes U_R(1),$$

здесь  $SU_c(3)$  — группа симметрии цветового взаимодействия,  $SU_L(2) \otimes U_R(1)$  — группа электрослабых взаимодействий, знак  $\otimes$  обозначает прямое произведение групп,  $SU(n)$  — обозначение для группы, состоящей из комплексных унитарных матриц размерности  $n \times n$  с определителем, равным 1, группа  $U(1)$  — группа всех комплексных чисел, равных по модулю единице. Знание этой формулы (группы симметрии Стандартной модели) достаточно, чтобы по определенным правилам получить уравнения, описывающие динамику электромагнитного, сильного и слабого взаимодействий.

Симметрия группы  $G_{\text{SM}}$  является точной при рассмотрении взаимодействий на масштабах энергии выше 100 ГэВ. Однако наличие массивного бозона Хиггса ( $m_H = 125$  ГэВ) нарушает эту симметрию. И при низких

<sup>1</sup>Группой является любой набор объектов, имеющий свойства: а) «групповое произведение» любых двух элементов из данного набора также входит в этот набор, для каждого элемента существует обратный элемент, и существует единичный элемент. Например, целые числа образуют группу со сложением в качестве группового произведения — сумма любых двух целых чисел также дает целое число, число с противоположным знаком дает обратный элемент, а роль нейтрального элемента играет нуль. Образуют группу и рациональные числа с обычным умножением. Другой пример — группа квадратных матриц с ненулевым определителем.

энергиях точной оказывается симметрия

$$G = SU_c(3) \otimes U(1).$$

Так, в теории электрослабого взаимодействия, объединяющего электродинамику и слабые взаимодействия, при сверхмалых расстояниях (порядка  $10^{-18}$  м) существуют четыре равноценных безмассовых поля, которые при больших масштабах в силу спонтанного нарушения превращаются в три массивных бозона с массами порядка 100 ГэВ ( $W^\pm, Z^0$ ) и один безмассовый фотон.

Успехи Стандартной модели беспрецедентны. С ее предсказаниями согласуются тысячи и тысячи проведенных экспериментов, в отдельных случаях с точностью вплоть до  $10^{-12}$ . С другой стороны, очевидно, что Стандартная модель не может являться последним словом в физике элементарных частиц, ибо она содержит слишком много внешних параметров (массы частиц, константы взаимодействия и др. — всего более 20), а также не включает гравитацию. Поэтому поиск отклонений от Стандартной модели (так называемой «*Новой физики*») — одно из самых активных направлений исследований в современной физике.

Несмотря на все достоинства Стандартной модели, до сих пор многие принципиальные вопросы остаются нерешенными.

Перечислим лишь некоторые из них:

Почему гравитация является такой слабой силой? Возможно ли в принципе объединение гравитации и Стандартной модели, основанной на квантовой теории поля?

Возможно ли объединение всех типов взаимодействий — *Великое объединение*?

Существует ли более трех поколений кварков и лептонов? Связано ли число поколений с размерностью пространства? Почему вообще существуют поколения?

Проблема иерархии фермионных масс: почему так сильно различаются массы фермионов (от  $< 1$  эВ у нейтрино до 173 ГэВ у  $t$ -кварка, различие в  $10^{11}$  раз)?

Есть ли внутренняя структура у кварков и лептонов?..

## Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение симметрии.
2. Приведите примеры непрерывных симметрий.
3. Сформулируйте теорему Людерса-Паули.
4. Что такое суперсимметрия?
5. Сформулируйте теорему Нётер.
6. Что такое Стандартная модель?

## Глава 4

# Основы квантовой теории

Исследование атомных явлений в начале XX в. показало, что присущая классической физике наглядность не позволяет осмыслить законы микромира. Колоссальные усилия и гениальные догадки многих физиков создали *Квантовую теорию* — революционное развитие принципов физики. Изменили свой физический смысл понятия: частица, волна, состояние, непрерывность, вероятность, детерминизм, измерение, движение, траектория и др. Физики научились понимать и «рассчитывать даже то, что невозможно себе представить»<sup>1</sup>.

Квантовая революция затронула все отрасли науки, философию, искусство, и особенно технику. Электричество и Квантовая физика составляют технологическую основу современной цивилизации.

### 4.1. Проблемы классической физики

#### 1. Излучение абсолютно черного тела

Со времен Ньютона шел спор о природе света. Что есть свет — совокупность частиц (*корпускул*, от латинского *corpusculum* — тельце, частица) или волн? Теории долго конкурировали. Волновая теория победила: корпускулярная теория, опираясь на механику Ньютона, не могла объяснить экспериментальные факты (интерференцию и дифракцию света). Важную роль сыграло то, что длина световых волн очень мала: диапазон длин волн видимого света от 380 до 760 нанометров. Более короткие электромагнитные волны — ультрафиолетовые, рентгеновские и гамма-лучи, а более длинные — инфракрасные, миллиметровые, сантиметровые и все остальные радиоволны.

---

<sup>1</sup>Л. Д. Ландау.

К концу XIX в. было твердо установлено, что свет и электромагнитное излучение вообще — все это электромагнитные *волны*.

Физики исследовали излучение нагретых тел и, в частности, законы теплового равновесного излучения, предельным случаем которого является излучение *абсолютно черного тела*. Такое тело поглощает все падающее на него электромагнитное излучение, при этом абсолютно черное тело само может испускать электромагнитное излучение.

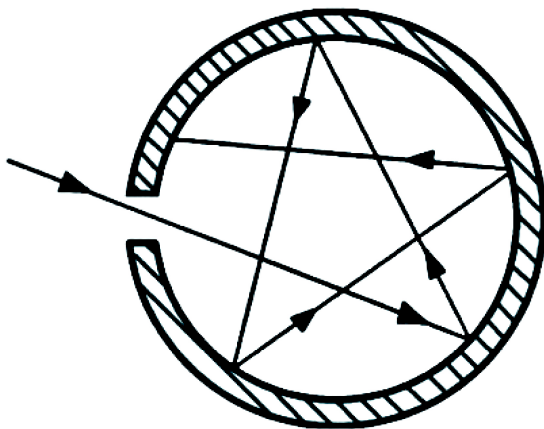


Рис. 4.1. Модель абсолютно черного тела

Абсолютно черных тел в природе не существует<sup>1</sup>, поэтому в физике для экспериментов используется модель, близкая по свойствам к идеализированному случаю: теплоизолированная непрозрачная замкнутая полость с небольшим отверстием, стенки которой имеют температуру  $T$  (рис. 4.1). Свет, попадающий внутрь сквозь это отверстие, после многократных отражений будет полностью поглощен. Полость имеет ненулевую температуру, поэтому в ней будет существовать тепловое излучение атомов материала, из которого она сделана. Прежде чем это излучение выйдет через малое отверстие, с ним произойдет огромное количество новых поглощений и излучений, так что излучение внутри полости будет находиться в *термодинамическом равновесии* со стенками. Иными словами, у излучения в полости будет температура  $T$ .

Используя законы термодинамики и волновые представления об излучении, Дж. Рэлей и позднее Дж. Джинс теоретически получили вид зависимости *спектра* излучения при данной температуре  $T$ . В области малых частот

<sup>1</sup>Например, сажа поглощает до 99 % падающего излучения в видимом диапазоне длин волн.



Рис. 4.2. Спектр излучения абсолютно черного тела  
Теоретические предсказания и экспериментальная зависимость спектра излучения абсолютно черного тела.

эта зависимость хорошо согласуется с экспериментом (см. рис. 4.2). Полная энергия излучения в полости, вычисленная на основе этого результата, оказывается равной бесконечности. Физически так быть не может, не может равняться бесконечности энергия в ограниченном объеме. Из-за того, что расходимость возникает в области больших частот (или очень коротких длин волн), эта ситуация получила название *Ультрафиолетовая катастрофа*.

Из других соображений был описан спектр в области высоких частот (закон Вина). Однако не получалось описать полный спектр излучения абсолютно черного тела, используя только понятия и методы классической физики.

В 1900 г. Макс Планк (1858–1947) предположил, что свет излучается порциями — **квантами** и минимально возможная энергия кванта данной частоты есть

$$E = h\nu,$$

здесь  $h$  — постоянная Планка. Числовое значение постоянной Планка, полученное из экспериментов по распределению интенсивности излучения, оказалось равным  $h \approx 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж · с. Понятно, почему дискретность изменения энергии не проявляется в повседневной жизни: порции энергии настолько малы, что ее изменение кажется непрерывным. Последовательно применяя эту идею, Планк получает формулу, правильно описывающую спектр излучения абсолютно черного тела (рис. 4.3).

Для получения видимого излучения необходимо, чтобы температура излучающего тела превышала  $570^\circ\text{C}$  (температура начала красного свечения,

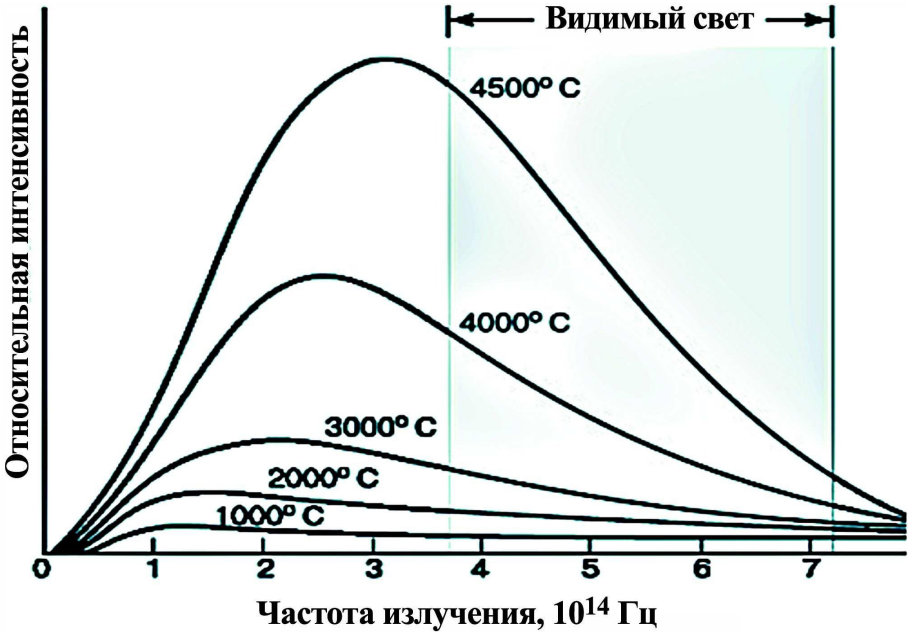


Рис. 4.3.

Спектр излучения абсолютно черного тела для различных температур

видимого человеческого глазом в темноте). Для зрения человека оптимальный, физиологически самый удобный, спектральный состав видимого света отвечает излучению абсолютно черного тела с температурой поверхности фотосферы Солнца  $6000^{\circ}\text{C}$ . В современных лампах накаливания применяется тугоплавкий и относительно недорогой металлический вольфрам — элемент, рекордный по температуре плавления. Рабочие температуры вольфрамовых нитей ламп накаливания лежат в пределах  $2000\text{--}2800^{\circ}\text{C}$ , поэтому (см. рис. 4.3) спектр ламп накаливания смещен в инфракрасную часть спектра, т. е. основная мощность потока излучения лежит в невидимом инфракрасном диапазоне и воспринимается в виде тепла. Чем меньше температура тела накаливания, тем меньшая доля энергии, подводимой к нагреваемой спирали, преобразуется в полезное видимое излучение и тем ниже КПД такой лампы. Поэтому в последние годы активно осуществляется переход на люминисцентные и светодиодные лампы.

Со спектром излучения абсолютно черного тела связано понятие **цветовой температуры** — температуры абсолютно черного тела, при которой оно испускает излучение того же цветового тона, что и рассматриваемое излуче-



ние. Цветовая температура 2000–3000 К соответствует теплomu (желтому) свету, 3000–5000 К — дневному свету, 5000–8000 К — холодному свету.

## 2. Фотоэффект

В 1888–1890 гг. русский физик А. Столетов изучал открытый ранее *фотоэффект* — явление испускания электронов веществом под действием света или другого электромагнитного излучения.

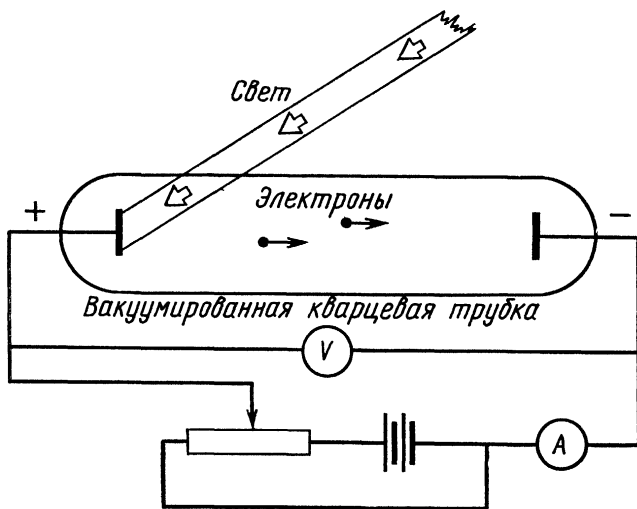


Рис. 4.4. Экспериментальное наблюдение фотоэффекта

Рисунок из книги А. Бейзера «Основные представления современной физики», (М.: Атомиздат, 1973).

Столетов показал, что, вопреки классической электродинамике, энергия вылетающего электрона всегда а) строго связана с частотой падающего излучения, б) не зависит от интенсивности облучения, в) отличается на постоянную в зависимости от сорта веществ.

Только в 1905 г. Альберт Эйнштейн теоретически объяснил фотоэффект (именно за эту работу ему в 1922 г. была присуждена Нобелевская премия). Опираясь на гипотезу Планка, Эйнштейн предположил, что свет не только излучается порциями (как у Планка), но и существует только в виде квантов — **фотонов**.

Каждый квант имеет энергию и импульс

$$E = h\nu, \quad p = \frac{h}{\lambda},$$

связанные с частотой  $\nu$  и длиной волны  $\lambda$ .

Тогда кинетическая энергия фотоэлектрона — электрона, выбитого из вещества взаимодействием с фотоном, будет равна энергии фотона  $h\nu$  минус работа выхода  $A^{\text{вых}}$  (своя для каждого вещества):

$$E_{\text{к}} = h\nu - A^{\text{вых}}.$$

Эта формула объяснила все эмпирические особенности фотоэффекта. Суть формулы заключается в том, что энергия фотона расходуется на ионизацию атома вещества и на работу, необходимую для «вырывания» электрона, а остаток переходит в кинетическую энергию электрона. Из этой формулы следует, в частности, существование красной границы фотоэффекта ( $h\nu_{\text{min}} = A^{\text{вых}}$ ), т. е. существование наименьшей частоты, ниже которой энергии фотона уже недостаточно для того, чтобы «выбить» электрон из металла (см. рис. 4.4).

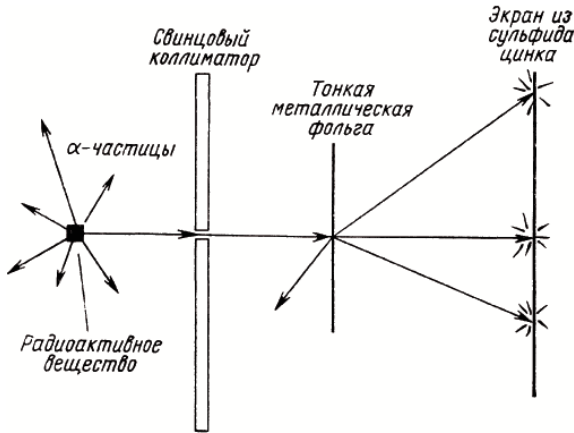


Рис. 4.5. Опыт Резерфорда по рассеянию α-частиц

Рисунок из книги А. Бейзера «Основные представления современной физики» (М.: Атомиздат, 1973).

Получалось, для объяснения взаимодействия излучения с веществом надо принять, что свет ведет себя как совокупность отдельных частиц — фотонов или что

**кванты излучения обладают свойствами частиц — корпускулярными свойствами.**

Оставалось неясным, как согласовать гипотезу световых квантов (частиц) с хорошо проверенными следствиями волновой теории электромагнитного излучения.

### 3. Строение атома

После открытия электрона Дж. Дж. Томсон в 1904 г. предложил свою модель строения атома, в которой в облаке положительного заряда, равного размеру атома, содержатся маленькие отрицательно заряженные электроны (подобно «изюму в пудинге»), суммарный электрический заряд которых равен заряду положительно заряженного облака, обеспечивая электронеutralность атома.

В 1911 г. Эрнест Резерфорд (1871–1937), исследуя прохождение  $\alpha$ -частиц (открытых им же в 1899–1900 гг.) через тонкую золотую фольгу (рис. 4.5), обнаружил противоречие данных эксперимента модели атома Томсона: некоторая доля  $\alpha$ -частиц отражалась от тонкой фольги почти на  $90^\circ$ . Сам Резерфорд говорил об этом результате: «Это было почти столь же невероятно, как если бы вы стреляли 15-дюймовым снарядом в кусок тонкой бумаги, а снаряд возвратился бы к вам и нанес удар».

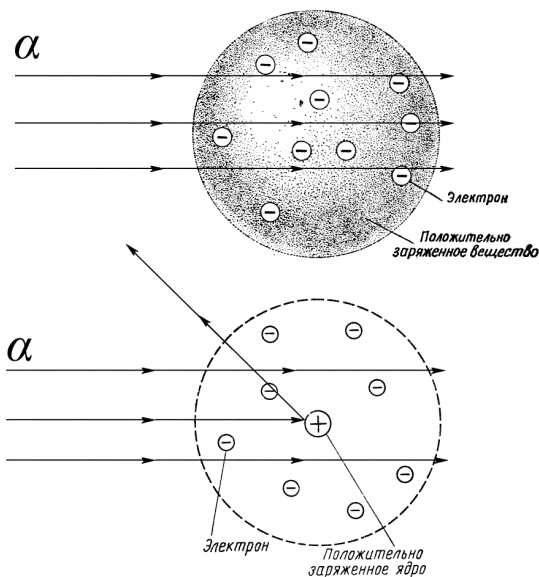


Рис. 4.6. Рассеяние  $\alpha$ -частиц в моделях атома Томсона и атома Резерфорда

Такое явление невозможно получить в томсоновой модели атома — по расчетам энергичные  $\alpha$ -частицы должны проходить сквозь «рыхлый» атом Томсона, почти не отклоняясь (рис. 4.6). Это странное поведение  $\alpha$ -частиц удавалось объяснить, если предположить, что в центре атома находится очень массивное ядро малого размера, имеющее положительный заряд, по величине равный сумме зарядов электронов. Так появилась *планетарная*

*модель* строения атома — модель Резерфорда. Согласно этой модели атом состоит из очень маленького положительно заряженного ядра, содержащего большую часть массы атома, и обращающихся вокруг него легких электронов.

Почти сразу же обнаружилась проблема этой модели — она противоречила классической электродинамике: электроны, двигаясь по орбитам, по законам классической электродинамики будут излучать электромагнитные волны. Излучая, электроны теряют энергию, и очень быстро, примерно за  $10^{-7}$  с, должны упасть на ядро (рис. 4.7). В этом случае атом не может существовать как стабильная система.

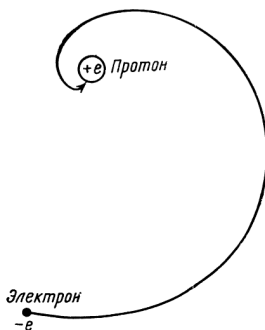


Рис. 4.7. Падение электрона на ядро

Кроме того, в теоретическом объяснении нуждались спектры излучения атомов (спектральные серии Лаймана, Балмера, Пашена и др. показаны на рис. В.6).

В 1913 г. Нильс Бор (1885–1962) предложил дополнить классическую физику следующими постулатами:

1. Атом может находиться в стационарном состоянии, в котором он не излучает и не поглощает энергию;
2. Излучение и поглощение света происходит при переходе атома из одного стационарного состояния в другое. Энергия излученного фотона равна разности энергий стационарных состояний:

$$\Delta E = E_n - E_m = h\nu_{nm}.$$

К числу постулатов можно добавить также условие квантования углового момента Бора–Зоммерфельда:

3. Момент импульса электрона в атоме принимает дискретный ряд значений:

$$L_n = hn, \quad n = 1, 2, \dots$$

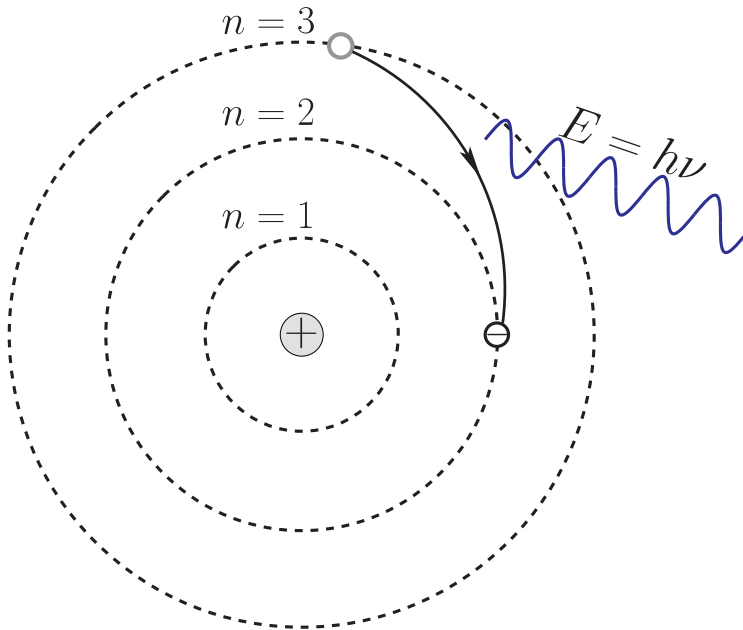


Рис. 4.8. Атом Бора

С помощью теории Бора удалось объяснить стабильность атома и спектры излучения простых атомов (рис. 4.8). Но происхождение и значение правил квантования — постулатов — оставались загадочными. Их смысл стал ясен только после создания квантовой механики.

## 4.2. Принципы квантовой механики

В 1923 г. Луи де Бройль (1892–1987) высказал гениальную догадку: если световые волны имеют свойства частиц, то, возможно, электрон имеет и волновые свойства, т. е. обладает таким же *дуализмом*, как и свет. И вообще,

каждый микрообъект имеет, с одной стороны, корпускулярные характеристики — энергию  $E$  и импульс  $p$ , а с другой стороны, волновые характеристики — частоту  $\nu$  и длину волны  $\lambda$  (при этом  $E = h\nu$  и  $p = h/\lambda$ ).

Например, человеку с массой 70 кг, движущемуся со скоростью 1 м/с, соответствует волна де Бройля с длиной волны  $\lambda = h/mv \approx 10^{-35}$  м, из-за таких малых длин волн никак не проявляются волновые свойства материальных объектов в макромире.

Для электронов же с энергиями от 1 эВ до 10 000 эВ длина волны де Бройля лежит в пределах от 1 нм до  $10^{-2}$  нм, что соответствует длинам волн рентгеновского излучения и характерным расстояниям между атомами в кристаллах. Поэтому волновые свойства электронов должны проявляться, например, при их рассеянии на тех же кристаллах, на которых наблюдается дифракция рентгеновских лучей.

Обнаружение дифракции электронов в опытах Дэвиссона, Джермера и независимо от них в опытах Томсона в 1927 г. стало блестящим подтверждением гипотезы де Бройля.

Отметим, что в то время как знаменитый отец Томсона Дж. Дж. Томсон открыл саму частицу электрон и получил за это Нобелевскую премию в 1906 г., Джордж Томсон продемонстрировал, что электрон обладает волновыми свойствами, в частности он может дифрагировать на упорядоченной решетке. За это открытие Дж. Томсон, К. Дэвиссон и Л. Джермер получили Нобелевскую премию в 1935 г.

Подтвержденная на опыте идея де Бройля о двойственной природе микрочастиц — **корпускулярно-волновом дуализме** — принципиально изменила представления об облике микромира. Поскольку всем микрообъектам присущи и корпускулярные, и волновые свойства, то, очевидно,

**любую из этих «частиц» нельзя считать ни частицей, ни волной в классическом понимании.**

Возникла потребность в такой теории, в которой волновые и корпускулярные свойства материи выступали бы не как исключаяющие, а как взаимно дополняющие друг друга. В основу такой теории — волновой, или квантовой механики, — и легла концепция де Бройля. Первыми последовательными физическими теориями, основанными на принципе корпускулярно-волнового дуализма, стали матричная механика Гейзенберга–Борна–Иордана и волновая механика Шрёдингера.

### 4.2.1 Матричная механика

В 1925–1926 гг. Вернер Гейзенберг, Макс Борн и Паскуаль Иордан опубликовали первый вариант квантовой теории, получивший название матричной механики, которая описывала квантовые явления с помощью таблиц наблюдаемых величин — матриц. Матричная механика позволяла достичь согласия с наблюдаемыми экспериментальными данными, при этом она не содержала никаких конкретных ссылок на пространственные координаты или время. Гейзенберг особенно настаивал на отказе от каких-либо простых наглядных представлений или моделей в пользу только таких свойств, которые могут быть определены из эксперимента, так как, по его соображениям, микромир имеет принципиально иное устройство, чем макромир, ввиду особой роли постоянной Планка, несущественной в мире больших величин.

Данный подход связан с идеей рассмотрения микрочастиц, по сути дела как корпускул, и описания процессов взаимодействия между ними с использованием только тех понятий, для которых можно указать процедуру их экспериментального измерения — *наблюдаемых* величин. При этом переход микросистемы из начального состояния в конечное происходит посредством некоего загадочного квантового скачка, а вопросы типа «каково состояние электрона в то время, когда он после акта излучения переходит в атоме с одной боровской орбиты на другую?» объявлялись не имеющими физического смысла, поскольку состояние электрона, без его существенного изменения, в момент перехода не может быть измерено ни одним физическим прибором.

Одним из многих важных результатов, полученных в рамках матричной механики, стало соотношение между наблюдаемыми величинами, известное как

#### **Принцип неопределенности Гейзенберга.**

Это фундаментальный принцип квантовой теории, согласно которому некоторые («дополнительные») величины, например координата и соответствующий ей импульс, не могут одновременно иметь определенные значения, т. е. измеримые со сколь угодно малой погрешностью.

Между этими погрешностями установлено соотношение, например,

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2,$$

где  $\Delta x$  — погрешность в измерении координаты частицы  $x$ ,  $\Delta p_x$  — погрешность в измерении проекции импульса частицы на направление оси  $x$ <sup>1</sup>.

В этом соотношении проявляется одно из принципиальных отличий микромира от нашего повседневного физического мира. В обычном мире, измеряя положение и скорость тела в пространстве, мы на него практически не воздействуем. Таким образом, в идеале мы можем одновременно измерить и скорость, и координаты объекта абсолютно точно, иными словами, с нулевой неопределенностью.

В мире квантовых явлений, однако, любое измерение воздействует на систему. Сам факт проведения измерения, например местоположения частицы (для этого частицу нужно, например, «осветить» фотоном), приводит к изменению ее скорости, причем непредсказуемому. Чем меньше неопределенность в отношении одной переменной (например,  $\Delta x$ ), тем более неопределенной становится другая переменная ( $\Delta p_x$ ), поскольку произведение двух погрешностей в левой части соотношения не может быть меньше константы в правой его части. Отметим, что нет никаких ограничений на точность измерения только одной из этих величин.

Принцип неопределенности связывает не только пространственные координаты и соответствующие импульсы. В равной мере неопределенность связывает и другие пары взаимно увязанных — *сопряженных* — характеристик микрочастиц. Например,

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2,$$

т.е. невозможно точно измерить энергию квантовой системы и определить момент времени, в который она обладает этой энергией. Если мы проводим измерение состояния квантовой системы для определения ее энергии, это измерение займет некоторый отрезок времени  $\Delta t$ . За этот промежуток времени энергия системы случайным образом изменяется, происходят ее *флуктуации*, и чем меньше был этот отрезок времени, тем больше может быть величина флуктуации энергии.

С принципом неопределенности связаны и свойства пустоты — вакуума. Если измерять энергию пустоты — места в пространстве, где нет каких-либо частиц и полей, то чем более короткие промежутки времени будут занимать эти измерения, тем больше будут погрешности в измеренной энергии. С точки зрения квантовой теории поля это означает, что в вакууме постоянно

<sup>1</sup>Аналогичные соотношения связывают и погрешности соответствующих проекций этих величин на другие оси:  $\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \hbar/2$ ,  $\Delta z \cdot \Delta p_z \geq \hbar/2$ .



рождаются и исчезают виртуальные частицы и античастицы, т. е. вакуум не является просто пустотой. Он представляет собой низшее энергетическое состояние квантовых полей и называется **физический вакуум**.

#### 4.2.2. Волновая механика

Прямым развитием идей де Бройля стало создание в 1926 г. волновой механики Эрвином Шрёдингером (1887–1961). В подходе Шрёдингера состояние квантовой системы описывается *волновой функцией* —  $\Psi(\{\vec{r}_i\}, t)$ . Это *комплекснозначная* функция, которая может зависеть от координат всех частиц системы ( $\{\vec{r}_i\} = \vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_N$ ) и от времени.

Опираясь на вид волн де Бройля, Шрёдингер угадал уравнение, которое в нерелятивистском случае описывает эволюцию волновой функции:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H}\Psi,$$

здесь  $\hat{H}$  — *оператор* полной энергии системы (*оператор Гамильтона*). Этот оператор действует на волновую функцию  $\Psi$ , в простейших случаях он равен сумме кинетической и потенциальной энергий. Уравнение Шрёдингера — линейное дифференциальное уравнение в частных производных.

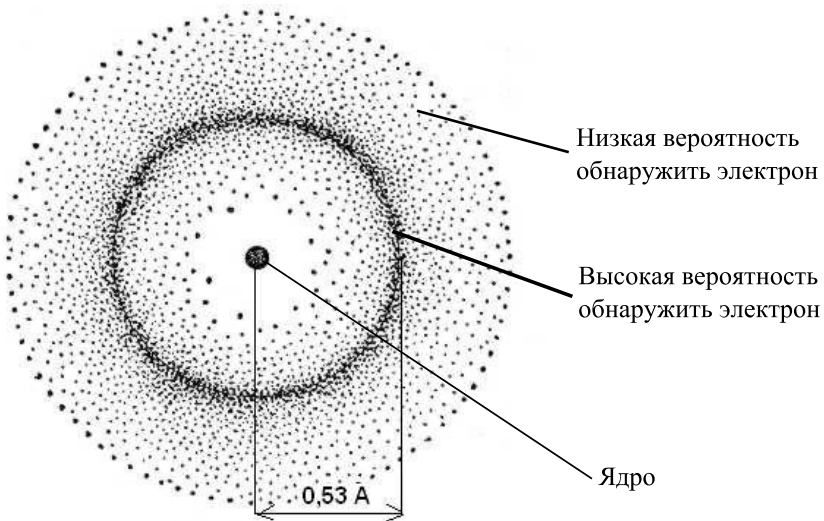


Рис. 4.9. Атом водорода в основном состоянии. Электронное облако

Немного позднее Шрёдингер доказал полную математическую эквивалентность его волновой механики и матричной механики Гейзенберга–Борна–Йордана. Он показал, что любое уравнение волновой механики можно представить в матричной форме и, наоборот, от заданных матриц можно перейти к волновым функциям.

Квантовая теория — единственная физическая теория, которая имеет несколько различных интерпретаций используемого в ней математического аппарата и базовых понятий — копенгагенскую, многомировую, статистическую и др. Рассмотрим подробнее первые две из них.

### 4.2.3. Копенгагенская интерпретация квантовой механики

В 1927 г. Нильс Бор и Вернер Гейзенберг во время совместной работы в Копенгагене сформулировали копенгагенскую интерпретацию квантовой механики.

Согласно копенгагенской интерпретации квантовой механики

плотность вероятности  $P$  нахождения частицы в данной точке пространства  $\vec{r}$  в данный момент времени  $t$  пропорциональна квадрату модуля волновой функции  $|\Psi(\vec{r}, t)|^2$ .

В философскую основу копенгагенской интерпретации положен ряд принципов.

**Принцип наблюдаемости** — исключение, насколько возможно, из физической теории утверждений, которые не могут быть проверены непосредственным наблюдением.

**Принцип дополненности** — возможно описание объектов двумя взаимоисключающими способами, волновое и корпускулярное описание микрообъектов являются дополнительными друг к другу.

**Принцип неопределенности** — координата и импульс микрообъектов не могут быть определены независимо друг от друга и с абсолютной точностью.

**Принцип статистического детерминизма** — данное состояние физической системы определяет ее последующее состояние не однозначно, а лишь с определенной вероятностью, описывающей меру возможности осуществления заложенных в прошлом тенденций изменения.

**Принцип соответствия** — законы квантовой механики переходят в законы классической, когда можно пренебречь величиной постоянной Планка  $h$ .

#### 4.2.4. Многомировая интерпретация

В 1957 г. Х. Эверетт предложил еще одну нетривиальную интерпретацию квантовой механики. В ней предполагается существование в некотором смысле множества «параллельных вселенных», в каждой из которых действуют одни и те же законы природы и которым свойственны одни и те же фундаментальные постоянные, но все они находятся в различных состояниях.

В этой интерпретации каждое событие является точкой ветвления — любое даже самое малое событие создает новый экземпляр в бесконечной череде вселенных, при этом самые близкие почти не отличаются. Каждая такая вселенная является реальной, но между собой они не взаимодействуют.

Правда ли это? Мы не знаем, но такая *интерпретация* возможна.

\* \* \*

В целом же проблема интерпретаций квантовой механики не оказывает большого влияния на практическую работу физиков. Вот как об этом говорит нобелевский лауреат Стивен Вайнберг [19, с. 68]:

*«Самое удивительное в том, насколько все это не имеет значения. Большинство физиков использует квантовую механику в повседневной работе, не заботясь о фундаментальных проблемах ее интерпретации. Будучи здравомыслящими людьми, имеющими очень мало времени на то, чтобы успевать следить за новыми идеями и данными в своей собственной области, они совершенно не тревожатся по поводу всех этих фундаментальных проблем. Недавно Филип Канделас (с физического факультета Техасского университета) ждал вместе со мной лифт, и разговор зашел о молодом теоретике, подававшем надежды на старших курсах и затем исчезнувшем из вида. Я спросил Фила, что помешало бывшему студенту продолжать исследования. Фил грустно покачал головой и сказал: „Он попытался понять квантовую механику“».*

#### 4.2.5. Результаты квантовой механики

В заключение перечислим некоторые результаты квантовой механики:

1. Строение атомов, ядер, молекул. Объяснение периодической системы Менделеева;
2. Физические основания химии. Химическая связь. Валентность;
3. Тепловые законы. Зависимость теплопроводности, сопротивления, упругости и др. характеристик вещества от температуры;
4. Теория твердого тела. Объяснение деления веществ на металлы, диэлектрики. Зонная теория. Создание полупроводников;
5. Магнитные явления. Ферромагнетизм;
6. Квантовые генераторы. Лазеры;
7. Туннельные переходы;
8. Сверхпроводимость и сверхтекучесть;
9. Принципы описания элементарных частиц;
10. Экстремальные состояния вещества. Белые карлики и нейтронные звезды;
11. Квантовые флуктуации. Структура Вселенной.

#### Вопросы для самоконтроля

1. Укажите основные предпосылки, которые привели к созданию квантовой теории.
2. Как зависит энергия фотона от его частоты?
3. Сформулируйте постулаты Бора.
4. В чем состоит суть гипотезы Луи де Бройля?
5. В чем состоит суть принципа неопределенности Гейзенберга?
6. Дайте определение физического вакуума.
7. Сформулируйте основные принципы Копенгагенской интерпретации квантовой механики.

## Глава 5

### ОСНОВЫ КОСМОЛОГИИ

**Космология** — наука, изучающая рождение и эволюцию Вселенной<sup>1</sup>.

Особенность современной космологии состоит в том, что при разработке новых теоретических моделей приходится использовать практически все разделы физики. Квантовая теория поля, физика элементарных частиц, ядер и атомов, статистическая физика, теория гравитации, астрофизика — вот далеко не полный перечень областей знания, взаимосвязи между которыми необходимо учитывать. Особое значение для космологии имеет физика элементарных частиц. Именно законы взаимодействия частиц при больших энергиях (фундаментальная структура микромира) оказывают определяющее влияние на процессы на очень ранней стадии эволюции Вселенной.

Кроме того, уже известные законы и наблюдательные данные помогают проверять новые идеи. Нередко имеется несколько различных моделей, объясняющих наблюдательные данные, но только будущие исследования выявят истинную.

Верно и обратное. Космология дает уникальную информацию о физике элементарных частиц, например о массе и числе типов нейтрино, которые можно оценить из скорости формирования скоплений галактик, т. е. фактически из информации о реликтовом фоновом излучении. Теоретическая космология ранней Вселенной переплелась с физикой элементарных частиц настолько, что ее выделяют в отдельную науку — **космомикрофизику**.

Мы живем в удивительное время — предыдущие поколения не представляли себе всю судьбу Вселенной, возможные варианты ее истории, ее прошлого и будущего. Только сейчас становится понятным общий ход эволюции Вселенной. Конечно, многие существенные детали еще неясны, но возможные варианты эволюции нашей Вселенной уже названы. Все больше общих вопросов о Вселенной, ранее связанных с философией, метафизикой и онтологией, получают сейчас конкретное физическое содержание.

---

<sup>1</sup>Подробнее о космологии см. [11, 12, 21–24].

## 5.1. История космологических представлений

Созданная в глубокой древности картина мира отражала наивные представления людей тех времен о противоположности земного небесному (см. рис. 5.1). Им казалось, что Земля неподвижная и плоская, а вокруг нее вращается «небесная твердь». Следовательно, все мироздание конечно и ограничено.

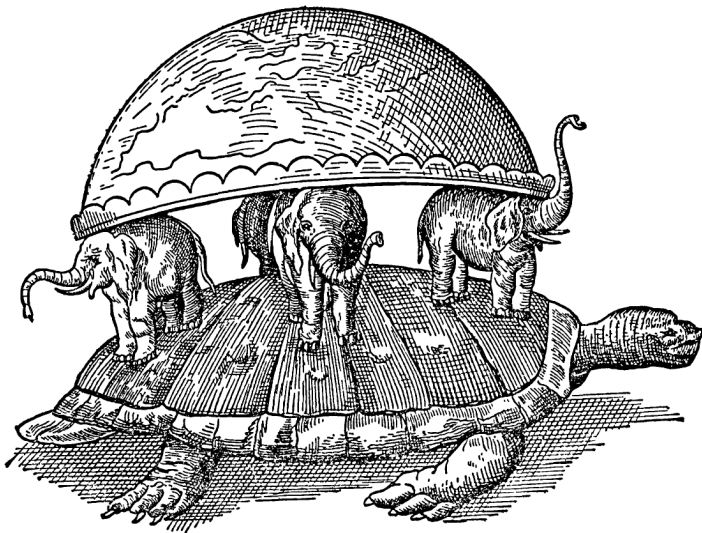


Рис. 5.1. Земля на четырех слонах и черепахе

Рисунок из книги К. Ф. Огородникова «На чем Земля держится» (М., 1953).

В обыденной жизни Земля кажется плоской, так как кривизна земного шара мала на расстоянии, которое человек способен обзреть с высоты собственного роста. Сдвиг линии горизонта замечен наблюдателю только с большой высоты. Таким образом, в первобытную эру наивное представление о Земле как плоской равнине было вызвано объективными причинами.

И в дальнейшем изменение и развитие представлений о мироздании связаны, прежде всего, с развитием способов наблюдения и получением новых наблюдательных данных.

В IV в. до н. э. греческий философ Аристотель создал **геоцентрическую систему мира**: вокруг неподвижной Земли вращаются восемь небесных сфер. Земля — центр мира (рис. 5.2).

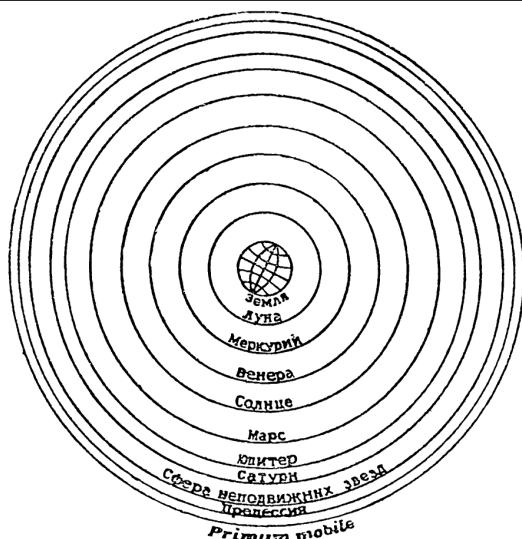


Рис. 5.2. Геоцентрическая система мира Аристотеля

Рисунок из книги К. Л. Баева «Коперник» (М., 1935).

С III в. до н. э. центром греческой науки становится Александрия. В ее обсерватории астрономы точно и систематически определяли положение небесных светил. Тогда были обнаружены непонятные петлеобразные перемещения планет (рис. 5.3), которые не могли быть объяснены аристотелевским равномерным круговым движением концентрических небесных сфер.

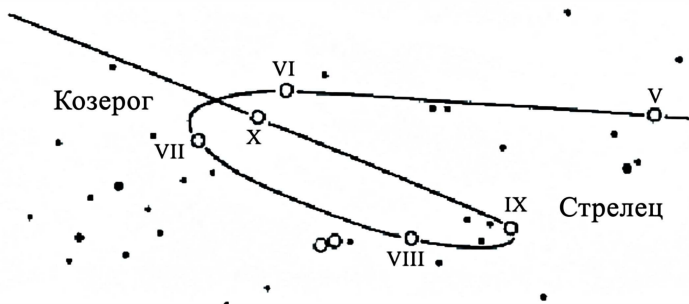


Рис. 5.3. Видимое перемещение Марса в течение полугода

Объяснение петлеобразному движению планет дал александрийский ученый Птолемей (II в. до н. э.): каждая планета движется по эпициклу, центр которого, в свою очередь, движется по деференту вокруг Земли,

причем это движение происходит в разных плоскостях, что и создает впечатление петлеобразного перемещения (рис. 5.4).

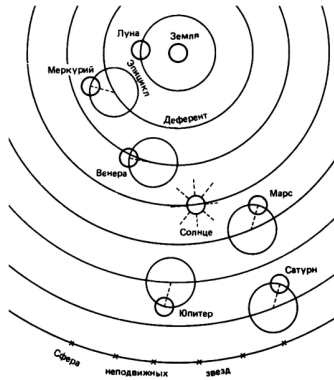


Рис. 5.4. Геоцентрическая система мира согласно Птолемею

Рисунок из книги Н. Николова, В. Харалампиев «Звездочеты древности» (М.: Мир, 1991).

Введение понятия эпицикла, с одной стороны, позволило весьма точно описывать наблюдаемое движение планет Солнечной системы на земном небосклоне, но, с другой стороны, требовало трудоемких вычислений и не позволяло построить непротиворечивую теорию строения Солнечной системы.

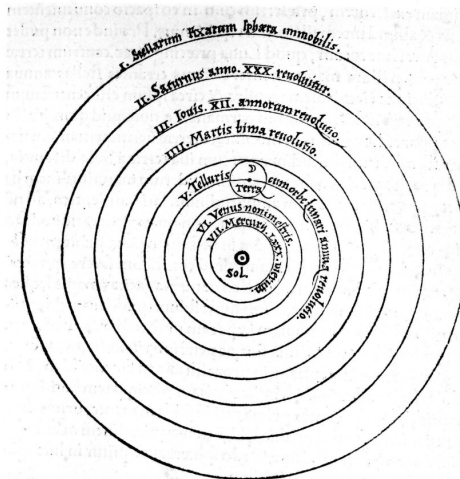


Рис. 5.5. Солнечная система в представлении Коперника

Рисунок из книги Н. Коперника «О вращении небесных сфер» (Нюрнберг, 1543).



Такая теория появилась спустя более чем полторы тысячи лет в XVI в. Николай Коперник (1473–1543) создает **гелиоцентрическую систему мира**. Коперник в гелиоцентрической системе помещает в центр мироздания Солнце и устанавливает истинное положение Земли как планеты в пространстве. Все детали видимых движений планет естественным образом объясняются годовым движением Земли и других планет вокруг Солнца.

Учение Коперника произвело революцию не столько в астрономии, сколько в мировоззрении людей, в их понимании природы и способов ее познания. Именно публикация в 1543 г. книги Николая Коперника «О вращении небесных сфер» (и в тот же год книги Андреаса Везалия «О строении человеческого тела») считаются событиями, положившими начало научной революции. Коперник по-прежнему использовал эпициклы для моделирования неравномерности движения планет по орбитам. Полностью отказался от эпициклов только Иоганн Кеплер (1571–1630), открывший законы движения планет. Всего же потребовалось еще около 200 лет для того, чтобы модель Коперника полностью заменила модель Птолемея.

Революционной стала космология Джордано Бруно (1548–1600). Опираясь на гелиоцентрическую модель Коперника и философию Николая Кузанского, Бруно утверждал<sup>1</sup>:

1. Вселенная бесконечна;
2. При наблюдении из всех точек Вселенная должна выглядеть примерно одинаково (см. рис. 5.6);
3. Звезды — это далекие солнца;
4. Физические законы одинаковы во всей Вселенной;
5. Небесная и земная материя состоит из одних и тех же элементов;
6. Во Вселенной нет ничего вечного, планеты и звезды рождаются, изменяются, умирают.

В современных представлениях о космологии вопрос о бесконечности Вселенной остается открытым. А остальные идеи, с небольшими оговорками, справедливы и сегодня. В то же время один из основных метафизических

---

<sup>1</sup>Здесь перечислены основные идеи космологии Джордано Бруно, за исключением идей, связанных с метафизикой, религией и теологией (герметизм, пантеизм, гилозоизм и др.). Джордано Бруно был осужден инквизицией и умер на костре 17 февраля 1600 г. Причины казни Джордано Бруно с достоверностью неизвестны, неясно даже связаны ли они с революционной смелостью его космологии — учение о множественности населенных миров находилось в явном противоречии с догматами христианства. В тексте приговора сказано, что ему инкриминируется восемь еретических положений, однако сами эти положения (за исключением отрицания им догмата евхаристии) не приведены.

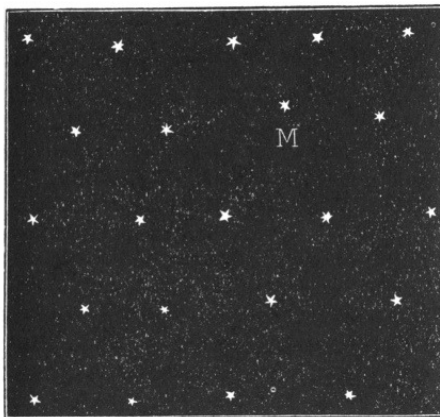


Рис. 5.6. Вселенная Джордано Бруно

Иллюстрация из книги: И. Кеплера «Краткое изложение коперниковой астрономии» (1618 г).  
Буквой М отмечен наш мир.

постулатов Бруно — всеобщая одушевленность материи — так же далек от современной науки, как и от науки XVI в.

Возникновение современной космологии связано с развитием в XX в. наблюдательной астрономии с использованием всех диапазонов электромагнитного излучения, общей теории относительности (ОТО) Эйнштейна и физики элементарных частиц. В исследовании космологических следствий ОТО в 1917 г. Эйнштейн ввел три предположения: Вселенная однородна, изотропна и стационарна. Чтобы обеспечить последнее требование, Эйнштейн добавил в уравнения гравитационного поля дополнительный «космологический член  $\Lambda$ ». Полученное им решение означало, что Вселенная имеет конечный объем, т. е. замкнута, и положительную кривизну.

В 1922 г. российский физик Александр Фридман (1888–1925) предложил нестационарное решение уравнения Эйнштейна, в котором изотропная Вселенная расширялась из начальной сингулярности. Из решения Фридмана также следовало, что стационарное решение Эйнштейна будет неустойчивым, т. е. рано или поздно и в модели Эйнштейна начнется либо расширение, либо сжатие.

Теория Фридмана вызвала изначально резкое неприятие со стороны Эйнштейна, однако позже Эйнштейн признал ограниченность своей модели Вселенной, назвав космологическую постоянную (введенную им в уравнения как средство для поддержания стационарности Вселенной) своей «самой большой научной ошибкой». Однако в настоящее время обнаружены

ускоренное расширение Вселенной и связанная с таким расширением темная энергия, природа которой пока неясна. Предполагается, что эта энергия связана с энергией вакуума. Такие свойства вакуума могут быть описаны в модели с космологической постоянной Эйнштейна, хотя и без предполагавшейся им стационарности. Подтверждением теории нестационарной Вселенной стало открытие в 1929 г. Э. Хабблом космологического красного смещения галактик.

В XX в. с развитием оптических телескопов и телескопов, работающих в других диапазонах электромагнитных излучений (радио, инфракрасные, рентгеновские телескопы), ученые получили возможность использовать разнообразные наблюдательные данные высокой точности и детальности о Вселенной. Любая новая космологическая модель оказывается очень жестко «зажата» всей совокупностью наблюдений, которая должна объясняться в ее рамках. И тем удивительнее, что такие модели создаются и развиваются, проясняя историю и дальнейшую эволюцию Вселенной (см. рис. 5.7).

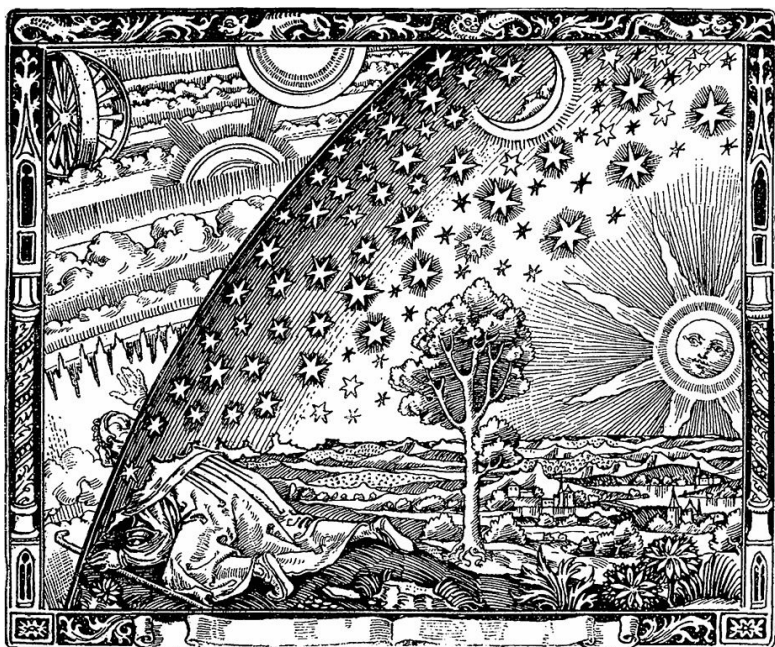


Рис. 5.7.

«Пилигрим рассказывает, что нашел точку, где небо касается Земли»  
Гравюра из книги К. Фламмарiona «Атмосфера: Популярная Метеорология» (Paris, 1888).

## 5.2. Наблюдаемые факты о Вселенной

Рассмотрим наблюдаемые факты, которые должна объяснять любая современная космологическая модель.

### 1. Расширение Вселенной

Установлено, что Вселенная расширяется в соответствии с законом Хаббла:

$$v = H \cdot r,$$

т. е. скорость движения удаленной галактики  $v$  пропорциональна расстоянию до наблюдателя  $r$ , с коэффициентом пропорциональности, называемым **постоянной Хаббла**  $H$ .

На первый взгляд кажется, что из закона Хаббла как будто следует, что именно наше местоположение является тем центром, от которого разбегаются все остальные галактики. Однако это не так. Если бы мы располагались в любой другой звездной системе, мы зафиксировали бы точно такой же закон разбегания галактик (рис. 5.8).

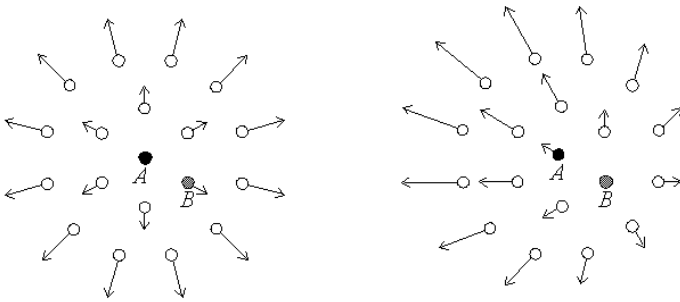


Рис. 5.8. Движение галактик

График, иллюстрирующий независимость закона Хаббла от положения галактики, из которой производится наблюдение. Слева: точка наблюдения — галактика А, справа: точка наблюдения — галактика В; длины стрелок соответствуют скоростям галактик.

С течением времени «постоянная» Хаббла изменяется, тем не менее в каждый данный момент времени во всех точках Вселенной постоянная Хаббла одинакова. Величина, обратная постоянной Хаббла, имеет смысл характерного времени расширения Вселенной на текущий момент.

По последним измерениям (2015 г.) постоянная Хаббла имеет величину  $H \approx 67,4$  (км/с)/Мпк. Это означает, к примеру, что если какая-то галактика находится на расстоянии в 100 Мпк от нас, то, согласно закону Хаббла<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Важно отметить, что закон Хаббла выполняется лишь приблизительно, потому что галактики, помимо скоростей, связанных с расширением Вселенной, обладают еще случайными скоростями собственных движений — от нескольких сотен до нескольких тысяч

она удаляется от нашей Галактики в современную эпоху со скоростью около 7000 км/с.

**Возраст Вселенной** — промежуток времени, прошедший с начала расширения, вычисленный на основе значения постоянной Хаббла (и других наблюдаемых свойств Вселенной), составляет  $13,81 \pm 0,06$  млрд лет.

## 2. Барионная асимметрия Вселенной

Во Вселенной могли бы существовать целые области со звездами и галактиками, состоящими из антивещества — позитронов, антипротонов и антинейтронов. Однако по каким-то причинам в видимой части Вселенной преобладает вещество. Ни Стандартная модель, ни общая теория относительности не приводят к автоматическому появлению областей из антивещества — *барионной асимметрии*.

Простейшее объяснение барионной асимметрии состоит в том, что изначальные условия расширения Вселенной уже были несимметричными, что и привело к наблюдаемой асимметрии. Этот вариант, хотя и возможный, не обладает, однако, эстетической привлекательностью и не дает новых интересных следствий, что приводит физиков к поиску более глубоких причин возникновения асимметрии из изначально симметричного состояния.

Наиболее распространены гипотезы, расширяющие Стандартную модель таким образом, что в некоторых реакциях возможно более сильное нарушение CP-инвариантности по сравнению с ее нарушением в Стандартной модели (идея А. Д. Сахарова). В этих теориях предполагается, что изначально количество барионной и антибарионной материи было одинаково, однако впоследствии в силу каких-либо причин из-за несимметричности реакций относительно того, какие частицы — вещества или антивещества — в них участвуют, произошло постепенное нарастание количества барионного вещества и уменьшение количества антибарионного.

## 3. Однородность и изотропность Вселенной. Крупномасштабная структура Вселенной

На малых масштабах космос очень неоднороден по распределению массы — в пределах Солнечной системы множество различных объектов: космическая пыль, кометы, астероиды, планеты, Солнце (см. рис. 5.9–5.16). Солнечная система примерно за 250 миллионов лет обращается вокруг сверхмассивной черной дыры; вместе с Солнцем еще около 400 миллиардов звезд образуют галактику Млечный Путь. Млечный Путь и еще более 50 галактик входят в гравитационно связанную *Местную группу галактик*, размер ее примерно 1 Мпк.

---

км/с. по этой причине, если галактики находятся сравнительно близко по отношению к нам ( $r \sim 1$  Мпк), скорости случайных движений делают закон Хаббла неприменимым. Такие галактики могут как удаляться, так и приближаться к нам. Закон Хаббла достаточно точно выполняется только для далеких галактик.

## Земля

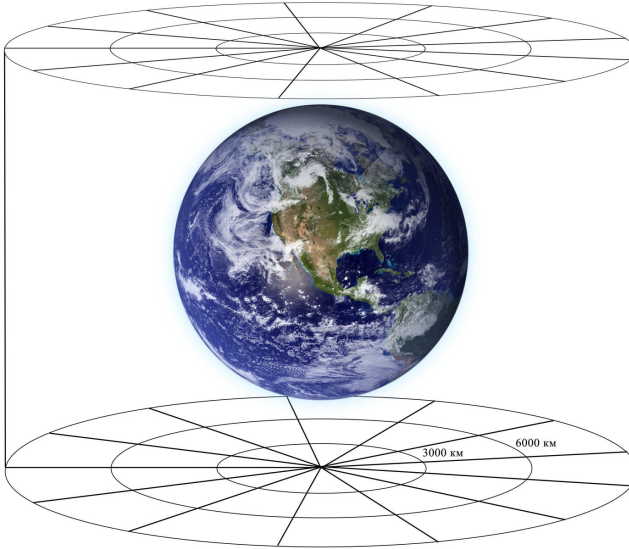


Рис. 5.9. Земля ( $\approx 12000$  км)

Этот и последующие 7 рисунков подготовлены на основе работ А. Colvin'a.

## Солнечная система

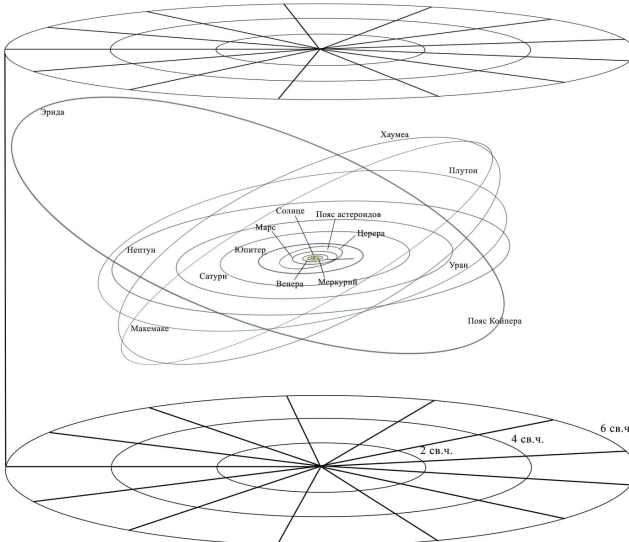


Рис. 5.10. Солнечная система (20 световых часов)

### Местное межзвёздное облако

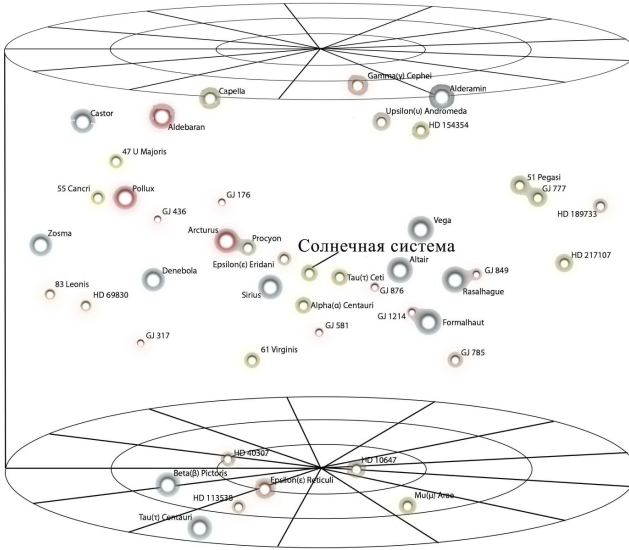


Рис. 5.11.

Ближайшее звездное окружение Солнечной системы (80 световых лет)

### Галактика Млечный Путь

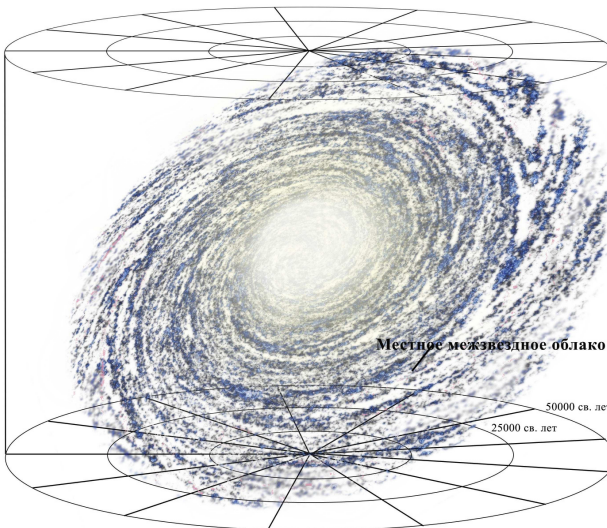


Рис. 5.12.

Наша галактика — галактика Млечный путь (100 тыс. световых лет)

### Местная группа галактик

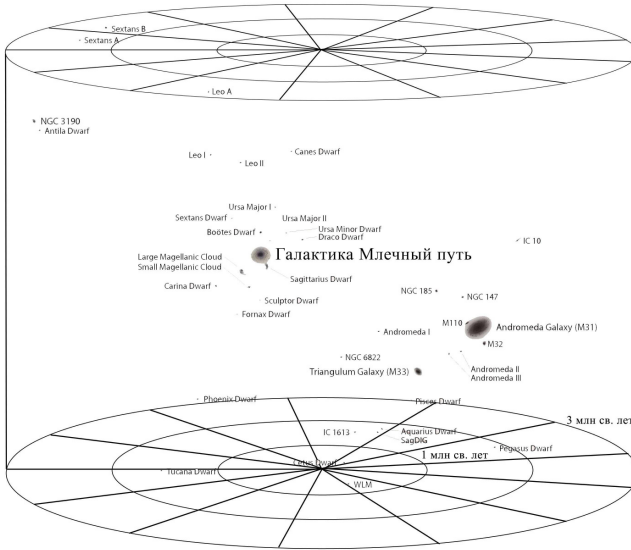


Рис. 5.13. Галактики (ближайшие к нашей — 6 млн световых лет)

### Сверхскопление Девы

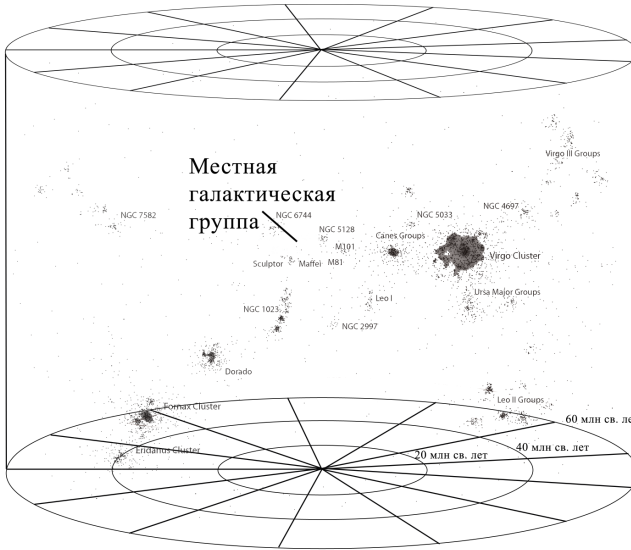


Рис. 5.14. Сверхскопление Девы (110 млн световых лет)



### Местные Сверхскопления

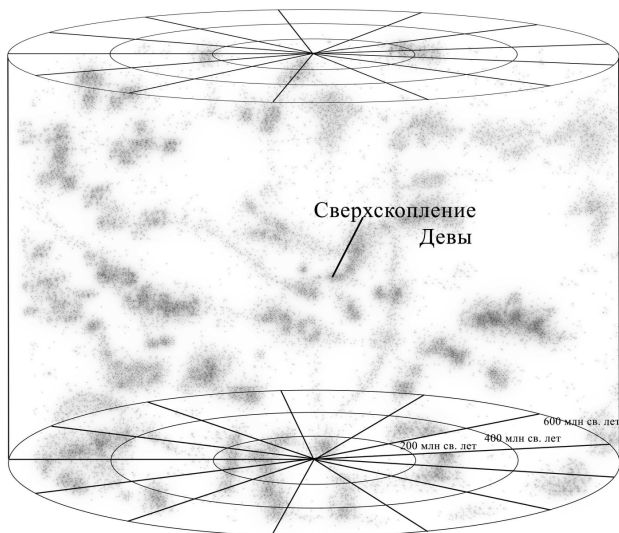


Рис. 5.15.

Окружение Сверхскопления Девы — Ланиакей (520 млн световых лет)

### Наблюдаемая Вселенная

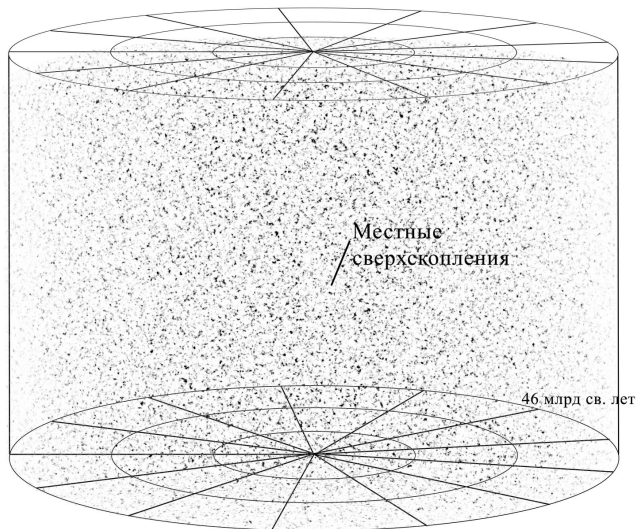


Рис. 5.16.

Видимые сверхскопления в наблюдаемой Вселенной (93 млрд световых лет)

100 Мпк — характерный размер *Местного сверхскопления галактик*, следующей в иерархии структуры после Местной группы, в нее входит уже около 30 тысяч галактик. Местное сверхскопление галактик называют также *Ланиакейя* (по-гавайски — «необъятные небеса»). Сверхскопления не являются гравитационно связанными, они расширяются вместе со всей Вселенной.

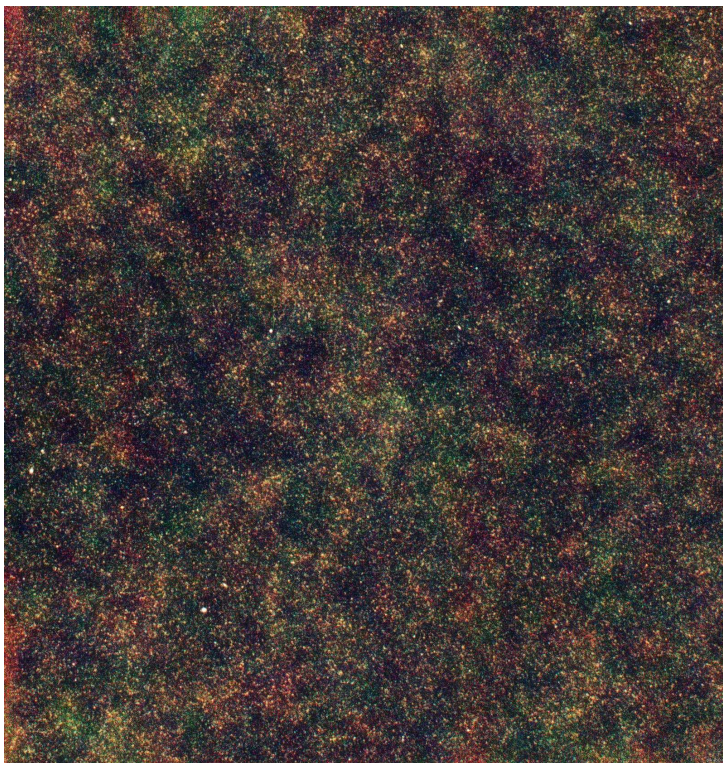


Рис. 5.17. Далекие галактики

Это фото сделано космическим телескопом «Гершель» 20 мая 2010 г. Каждая точка здесь — это целая галактика. Расстояние до галактик 10–13 миллиардов световых лет от Земли.

Естественно было бы предположить, что эта иерархия распространяется дальше на сколь угодно много уровней, но в 1990-е гг. астрономы выяснили, что на масштабах порядка 300 Мпк Вселенная практически однородна, что прекрасно согласуется с *космологическим принципом*.

Тем не менее в последние годы были открыты гигантские структуры во Вселенной: «Великая стена CfA2» (1989), «Великая стена Слоуна» (2003),

«Громадная группа квазаров» (2012), «Великая стена Геркулес–Северная Корона» (2013) — размеры этих *гиперскоплений* вплоть до 3 Гпк  $\approx$  10 млрд световых лет. Из оценок масс гиперскоплений следует, что в них может быть более  $10^{18}$  звезд.

Обнаружение таких сверхбольших структур представляет собой проблему для современной космологии. Согласно космологическому принципу, на очень большом масштабе наблюдений Вселенная должна быть однородной и изотропной, т. е. случайные флуктуации в массе и структуре материи между различными областями Вселенной должны быть очень незначительными. Размер гиперскопления в 10 млрд световых лет означает, что мы наблюдаем данную структуру такой, какой она была 10 миллиардов лет назад, или спустя 3,8 миллиарда лет после Большого Взрыва. Существующие модели эволюции Вселенной не допускают формирование на этом этапе таких сложных и массивных структур. Пока не существует гипотезы, каким образом такая большая структура могла сформироваться за относительно короткий срок.

Однако статистическая значимость этих феноменов для космологии пока не ясна — наиболее вероятно, что они не противоречат глобальной изотропии и однородности, наиболее строго доказываемой малостью флуктуаций реликтового излучения. Тем не менее является ли Вселенная однородной на масштабах порядка 1 Гпк или присутствуют большие структуры — остается открытым вопросом.

**Размер наблюдаемой Вселенной.** Размер *наблюдаемой Вселенной* из-за расширения Вселенной зависит от того, какое определение расстояния принять.

*Сопутствующее расстояние*<sup>1</sup> до самого удаленного наблюдаемого объекта (поверхности последнего рассеяния реликтового излучения) составляет около 14 миллиардов парсек ( $\approx$  46,5 млрд световых лет) во всех направлениях. Таким образом, наблюдаемая Вселенная представляет собой шар диаметром около 93 млрд световых лет.

Самый удаленный от Земли наблюдаемый объект, не считая реликтового излучения, — галактика, получившая обозначение UDFj-39546284, которая видна в инфракрасном диапазоне. Перед наблюдателем она предстает такой,

<sup>1</sup>Сопутствующее расстояние показывает, где далекие объекты находятся в данный момент, а не где они находились, когда излучали свет, который мы видим сейчас. Шкала сопутствующего расстояния расширяется вместе со Вселенной. Она дает нам представление о том, где в настоящее время находятся галактики, несмотря на то что наблюдаем мы удаленную галактику в том виде, какой она имела, когда была намного младше.

какой она являлась при возрасте Вселенной 480 миллионов лет. Свет от этой галактики достигает Земли приблизительно за 13 миллиардов лет. Однако с учетом расширения Вселенной в настоящее время эта галактика должна находиться на расстоянии  $\approx 34$  млрд световых лет от Земли.

Некоторые данные указывают, что в самом начале расширения Вселенной могла быть особая стадия этого расширения: *инфляционное расширение* — сверхбыстрое расширение Вселенной в первые мгновения ее существования. В случае реализации такого сценария вся Вселенная может быть намного больше наблюдаемой Вселенной (см. раздел 5.4.).

#### 4. Свойства реликтового излучения

Всю Вселенную пронизывает особый тип электромагнитного излучения — космическое микроволновое излучение, или *реликтовое излучение*. Это космическое электромагнитное излучение со спектром, характерным для излучения абсолютно черного тела с температурой 2,7255 К, практически одинаковое по всем направлениям (флуктуации составляют порядка  $10^{-4}$ ).

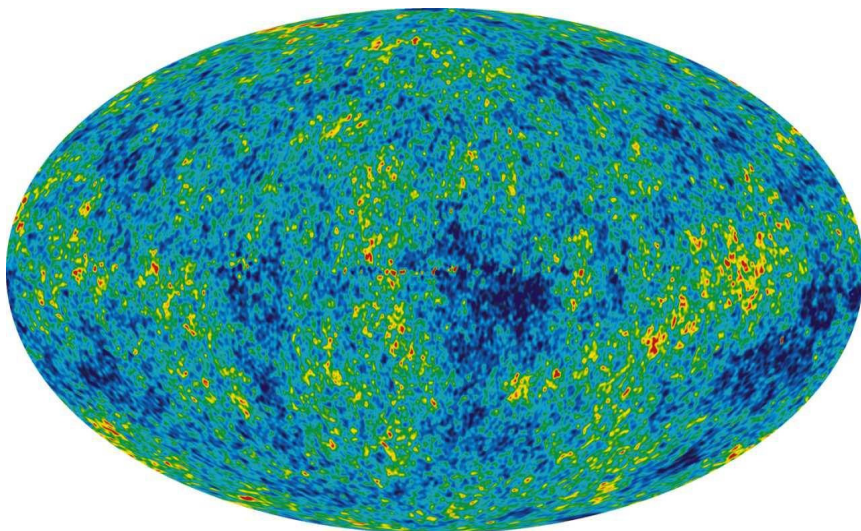


Рис. 5.18. Восстановленная карта реликтового излучения

Средняя температура излучения 2,7255 К; красные цвета означают более горячие области, а синие цвета — более холодные области, при этом разница между самыми холодными и самыми горячими участками составляет всего около 0,0002 К. Карта подготовлена по данным спутника WMAP.

Название «реликтовое» связано с тем, что оно несет в себе информацию о физических условиях во Вселенной тогда, когда еще не успели образоваться звезды и галактики. Сам факт существования этого излучения говорит о том, что в прошлом свойства Вселенной были существенно иными, чем в настоящее время.

Отметим, что почти идеальная однородность этого излучения — одно из свидетельств в пользу однородности Вселенной на больших масштабах.

### 5. Ускоренное расширение Вселенной

Ускоренное расширение Вселенной было открыто в 1998 г. при наблюдениях за сверхновыми типа Ia.

Если одна из звезд в тесной двойной системе звезд — *белый карлик* с массой меньше *предела Чандрасекара*, т. е. масса звезды меньше 1,44 массы Солнца), начинает перетягивать вещество со второй звезды системы (это явление называют — *аккреция*), то при превышении этой критической массы происходит взрыв сверхновой. При всех таких взрывах выделяется одинаковая энергия. Постоянство этого значения позволяет использовать сверхновые звезды типа Ia в качестве стандартных измерителей — «стандартных свечей» — для определения расстояний до далеких галактик.

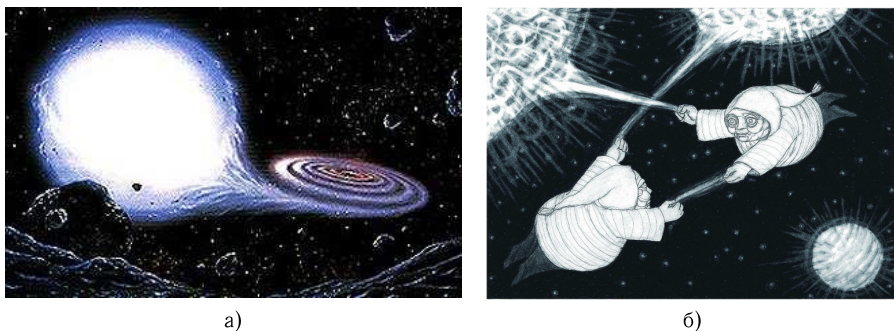


Рис. 5.19. а) Аккреция вещества на белый карлик;  
б) «Белые карлики, ворующие звездный свет» (неизв. автор)

Позже эти наблюдения были подкреплены другими источниками: измерениями реликтового излучения, гравитационного линзирования и др.

Такого результата космологи не ожидали. Дело в том, что различные космические объекты (галактики, скопления галактик, межгалактическое вещество) притягиваются друг к другу. Взаимное гравитационное притяже-

ние обычной материи приводит к тому, что галактики должны разбегаться с замедлением, а наблюдается ускорение. По меркам космологии эпоха ускоренного расширения началась недавно, примерно 5 млрд лет назад.

На основании этих наблюдений, свидетельствующих об ускорении расширения, было обнаружено существование неизвестного вида энергии с отрицательным давлением. Ее назвали **темной энергией**. В некоторых моделях ее можно связать с энергией вакуума. Однако целостного физического понимания, что такое темная энергия, пока нет.

### 5.3. Общие принципы в построении космологических моделей

При построении космологических моделей физики, помимо уже известных законов, опираются на ряд общих принципов. Рассмотрим два из них.

#### 5.3.1. Космологический принцип

Современная космологическая теория базируется на следующем основном положении, называемом *космологическим принципом*:

**каждый наблюдатель в один и тот же момент времени, независимо от места и направления наблюдения, обнаруживает во Вселенной примерно одну и ту же картину.**

Независимость от места наблюдений — равноправие всех точек пространства — однородность Вселенной, а независимость от направления, т.е. отсутствие выделенного направления в пространстве — изотропия Вселенной. Космологический принцип выполняется лишь приближенно, на масштабах, значительно превышающих размер скопления галактик. Корни космологического принципа восходят к натурфилософским системам Джордано Бруно, Рене Декарта, космологическим взглядам Исаака Ньютона.

Прямые подсчеты галактик указывают на то, что чем больше характерный размер системы галактик (группы, скопления, сверхскопления), тем слабее эта система выделена из окружающего фона. Например, системы с размером более 100 Мпк имеют плотность, лишь на несколько процентов превышающую среднюю плотность Вселенной. Это как раз и говорит о том, что с увеличением масштаба Вселенная стремится к однородности и изотропии в полном соответствии с космологическим принципом.

Уже непосредственно из космологического принципа следуют некоторые важные выводы относительно строения Вселенной. Например, Вселенная как целое не должна вращаться (поскольку ось вращения была бы выделенным направлением), у нее не должно быть центра и пространственной границы (иначе нарушалось бы условие однородности Вселенной). Вообще, главный вывод, вытекающий из космологического принципа, это безграничность Вселенной.

### 5.3.2. Антропный принцип

Рождение, эволюция Вселенной определяются физическими законами, значениями фундаментальных физических постоянных, массами и другими параметрами физики элементарных частиц. Является ли этот набор уникальным и единственно возможным? Есть ли какая-то неизвестная нам теория, в которой все эти параметры будут получаться автоматически? А что, если бы они были другими?

Один из создателей теории струн Леонард Сасскинд пишет [13, с. 19]:

*«Законы физики начинаются со списка элементарных частиц, таких как электроны, кварки и фотоны, и каждая обладает собственными уникальными свойствами, например массой и электрическим зарядом. Из этих объектов построено все остальное. Никто не знает, почему этот список именно такой и почему элементарные частицы обладают именно такими свойствами. Можно составить бесчисленное множество других подобных списков, но Вселенная, допускающая существование жизни, не терпит произвола в этом вопросе. Удаление из списка любой из этих элементарных частиц — электрона, фотона или кварка — или даже незначительное изменение любого из их свойств приведет к полному коллапсу обычной химии. В отношении электронов и кварков всё очевидно: из кварков состоят протоны и нейтроны, образующие атомные ядра, которые, в свою очередь, вместе с электронами образуют атомы. Без них атомы не могли бы существовать. Не столь очевидна важность существования фотонов... Фотоны с их уникальными свойствами ответственны за существование электромагнитных сил, удерживающих электроны в атомах и атомы в химических соединениях.*

*Если законы природы кажутся идеально подходящими для существования химии, то так же хорошо они приспособлены и для удовлетворения второму набору требований, а именно требованиям к характеру эволюции Вселенной, допускающему наше комфортное существование. Крупномасштабные свойства Вселенной — ее размеры, скорость расширения, существование галактик, звезд и планет — в основном регулируются силой гравитации. Казалось бы, свойства гравитации, особенно величину гравитационных сил, можно легко изменить. Слабость гравитационного взаимодействия остается по-настоящему необъяснимым чудом. Гравитационное притяжение между электроном и атомным ядром в десять тысяч миллиардов миллиардов миллиардов миллиардов раз слабее электрического. Но будь гравитационное взаимодействие хотя бы немного сильнее, Вселенная проэволюционировала бы так быстро, что на возникновение разумной жизни в ней не осталось бы времени».*

Один из возможных ответов на подобные вышеперечисленным вопросы дает **антропный принцип**: мы видим Вселенную такой, как она есть, потому что, будь она другой, нас бы здесь не было и мы бы не могли ее наблюдать.

Выделяют сильный и слабый антропные принципы.

*Слабый антропный принцип*: во Вселенной могут встречаться области с разными значениями мировых констант, но наблюдение некоторых их значений более вероятно, поскольку в регионах, где величины принимают эти значения, выше вероятность возникновения наблюдателя. Другими словами, значения мировых констант, резко отличные от наших, не наблюдаются, потому что там, где они есть, нет наблюдателей.

*Сильный антропный принцип*: Вселенная должна иметь свойства, позволяющие развиться разумной жизни.

Экстремальным вариантом сильного антропного принципа является *Антропный принцип участия*, сформулированный Джоном Уилером: разумные наблюдатели необходимы для обретения Вселенной бытия.

Различие этих формулировок можно пояснить так: сильный антропный принцип относится ко Вселенной в целом на всех этапах ее эволюции, в то время как слабый касается только тех ее регионов и тех периодов,



когда в ней теоретически может появиться разумная жизнь. Из сильного принципа вытекает слабый, но не наоборот.

С помощью антропного принципа можно разрешить ряд вопросов, а точнее, вывести их за рамки физического рассмотрения, однако значение антропного принципа оказывается спорным. Например, нобелевский лауреат Дэвид Гросс считает, что антропный принцип «лишь демонстрирует наше неумение ответить на сложные вопросы».

Приведем вновь слова Сасскинда [13, с. 32]:

*«Слову „ландшафт“ в том значении, в котором оно используется здесь, всего несколько лет, но с тех пор, как я в 2003 году ввел его в обращение, оно заняло прочное положение в космологическом лексиконе. Оно обозначает математическое пространство, представляющее все возможные природные условия, допускаемые теорией. Каждая возможная реализация условий содержит свои собственные физические законы, собственный набор элементарных частиц и фундаментальных констант. Некоторые из реализуемых миров очень похожи на наш, но отличаются в деталях. Например, один мир может содержать электроны и кварки и все прочие элементарные частицы известные в нашем мире, но гравитационное взаимодействие в нем будет в миллиард раз сильнее. В другом гравитационные силы будут такими же, как и в нашем мире, но электроны — тяжелее атомных ядер. Третий окажется во всем похож на наш, за исключением огромной отталкивающей силы (она описывается космологической постоянной), растаскивающей в разные стороны галактики, молекулы и даже атомы. И даже трехмерность нашего пространства не является „священной коровой“; отдельные области Ландшафта могут иметь четыре, пять, шесть и больше пространственных измерений.*

*Согласно современным космологическим теориям, разнообразие ландшафта приводит к соответствующему разнообразию в обычном пространстве. Лучшая на сегодняшний день теория Вселенной — инфляционная космология, против нашей воли приводит нас к концепции Мегаверсума, заполненного огромным количеством миров, которые Алан Гут назвал „карманными вселенными“. Некоторые из карманных вселенных микроскопически малы и никогда не достигнут макроразмеров. Другие*

— велики, как наша, но абсолютно пусты. И каждая из них расположена в собственной маленькой долине космического Ландшафта. Так что старый вопрос XX века „Что мы можем найти во Вселенной?“ теперь следует переформулировать в виде: „Что мы не можем в ней найти?“

*Следует также пересмотреть и переосмыслить место человека во Вселенной. Мегаверсум столь разнообразен, что вряд ли допускает существование разумной жизни повсюду, но она может развиваться в отдельных его частях. Согласно этой новой точке зрения, ответы на множество вопросов типа: „Почему эта физическая константа имеет именно такое значение, а не другое?“ будут радикально отличаться от тех, которые надеялись услышать физики. Уникальные значения констант не будут являться результатом строгого математического вывода, поскольку Ландшафт допускает бесконечное число вариаций всех возможных значений. Вместо этого ответом будет: „Где-то в Мегаверсуме эта константа имеет такое значение, а где-то — сякое. Мы живем в одном маленьком кармане, в котором значения констант таковы, что позволяют существовать жизни нашего типа. Именно поэтому. И это все! Других ответов нет“».*

Отметим, что концепция Мегаверсума, как и многие другие предположения, связанные с *теорией струн*, не подтверждаются пока физическими наблюдениями, и эта в некотором роде игра ума имеет обоснованную критику, (см., например, [14]).

### **Некоторые соотношения, необходимые для образования жизни**

Любое изменение фундаментальных постоянных оказало бы огромное влияние на физику, и, как правило, при значительном изменении этих констант сложные системы и жизнь не смогли бы возникнуть. Приведем здесь лишь некоторые более конкретные соотношения, которые оказываются критическими для существования жизни.

#### **1. Размерность пространства, равная трем**

Для размерности пространства более трех невозможны устойчивые орбиты планет в гравитационном поле звезд. Более того, в этом случае невозможна была бы и атомная структура вещества — электроны падали бы на ядра даже в рамках квантовой механики.

## 2. Значения масс электрона, протона и нейтрона

Свободный нейтрон тяжелее, чем система протон+электрон, и именно поэтому атом водорода стабилен. Если бы нейтрон был легче хотя бы на десятую долю процента, атом водорода быстро превращался бы в нейтрон. В результате материя имела бы лишь один уровень организации — ядерный, а атомов и молекул не существовало бы вовсе.

## 3. Существование дейтрона и отсутствие дипротона

Известно, что для образования связанного состояния двух частиц необходимо не только чтобы они притягивались, но и чтобы это притяжение было достаточно сильным. Притяжение между протоном и нейтроном называется почти «на грани»: их связанное состояние (дейтрон) существует, однако оно слабо связано и потому имеет довольно большие геометрические размеры. Это приводит к тому, что реакция горения водорода в звездах идет очень эффективно. Если бы сила протон-нейтронного взаимодействия была бы меньше, дейтрон был бы нестабилен и вся цепочка горения водорода оборвалась. Если бы константа связи была заметно сильнее, то размеры дейтрона были бы меньше и реакция горения шла бы не столь интенсивно. И в том и в другом случае оказалось бы, что звезды горели бы менее интенсивно, что не могло бы не сказаться на жизни.

С другой стороны, известно, что два протона не способны образовать связанного состояния: сильное взаимодействие хоть и превышает кулоновский барьер, но все же недостаточно сильно. Если бы константа сильного взаимодействия была бы немного больше, то дипротоны (ядра гелия с массой 2) были бы стабильными частицами. Это имело бы катастрофические последствия для эволюции Вселенной: в первые же ее дни весь водород выгорел бы в гелий-2 и дальнейшее существование звезд оказалось бы невозможным.

## 4. Нуклеосинтез в звездах

Ядра всех элементов, тяжелее гелия, образуются в звездах в ходе термоядерных реакций либо при взрыве сверхновой звезды — этот процесс называется *нуклеосинтезом*. Однако могло бы быть так, что из-за немного измененных закономерностей нуклеосинтеза, не образовывалось бы в значимом количестве углерода и других важных для жизни элементов.

## 5. Значения фундаментальных констант

Изменение значений фундаментальных констант существенно изменяет физику Вселенной. Например, сильное увеличение скорости света привело бы к тому, что при фиксированной энергии фотона (задаваемой разностью энергий атомных уровней) его импульс уменьшится, длина волны увеличится, изменится сечение рассеяния фотонов электронами, т. е. интенсивность электромагнитного взаимодействия. В итоге фотоны практически перестали бы взаимодействовать с веществом и, как пишет российский физик Л. Б. Окунь, «не было бы ни Солнца, ни электрической лампочки, чтобы светить, ни глаза, чтобы видеть»<sup>1</sup>.

### 5.4. Большой Взрыв. Инфляция. Нуклеосинтез

В предыдущих разделах мы обсуждали общие вопросы космологии. Здесь же мы рассмотрим основные этапы в развитии нашей Вселенной, а именно раннюю Вселенную.

Общепризнанной в настоящее время считается *теория Большого Взрыва* — рождение Вселенной из сингулярности. Эта теория подтверждается разнообразными и многочисленными наблюдательными данными.

Когда говорят о *ранней Вселенной*, обычно подразумевают эпоху, соответствующую возрасту от  $10^{-43}$  секунды до 3 минут от начала истории. В этот период эволюции Вселенной динамически сформировались многие ее свойства, которые сейчас проявляются в виде хаббловского расширения, крупномасштабной структуры Вселенной и т. д.

Ранняя Вселенная представляла собой высокооднородную и изотропную среду с необычайно высокой плотностью энергии, температурой и давлением. В результате расширения и охлаждения во Вселенной произошли фазовые переходы, аналогичные конденсации жидкости из газа, но применительно к элементарным частицам. В момент рождения Вселенной плотность  $\rho$  и температура  $T$  вещества достигали планковских значений:  $\rho_{pl} \simeq 10^{93}$  г/см<sup>3</sup>,  $T_{pl} \simeq 10^{32}$  К.

С момента Большого Взрыва Вселенная непрерывно расширяется, температура вещества понижается, а объем растет. При описании рождения Вселенной используются самые общие идеи о квантовой эволюции Вселенной как целого. Какие-либо точные количественные оценки свойств

<sup>1</sup>Окунь Л. Б. Фундаментальные константы физики. // УФН. 1991. Т. 161(9), С. 177–194.

Вселенной в момент ее рождения пока невозможны. Например, встречается утверждение, что полная масса замкнутой Вселенной равна нулю. Это означает, что вся Вселенная может родиться без затрат энергии из квантовой флуктуации.

Описывая дальнейшую эволюцию Вселенной можно пользоваться неклассическими уравнениями общей теории относительности (ОТО) для описания эволюции масштабного фактора  $a(t)$ , который характеризует изменение со временем расстояний между космологическими объектами. Уравнения ОТО предсказывают закон расширения Вселенной, если известны плотность энергии  $\rho$  и давление  $p$  вещества.

#### 5.4.1. Стадия инфляции

Через  $10^{-42}$  секунды после рождения пространства-времени во Вселенной начинается инфляционная стадия.

Астроном и космолог В. П. Решетников пишет [21, с. 168]:

*«Основой теории инфляции является представление о существовании некоторого скалярного поля — особого вида материи, обладающего огромной плотностью и отрицательным давлением. Отрицательное давление означает, что эта среда порождает мощные силы гравитационного отталкивания. Скалярное поле испытывает квантовые флуктуации, и в нем возникают области с большими значениями поля, которое начинает вести себя как космологическая постоянная и которое приводит к возникновению быстро расширяющихся областей.*

*В самом начале эволюции нашей Вселенной, еще до стадии Большого Взрыва, был период такого сверхбыстрого ускоренного расширения (или раздувания) — инфляции. Инфляция длилась примерно  $10^{-34}$  с, и за это время размер флуктуации вырос в огромное, невообразимое число раз. В некоторых вариантах теории этот рост составляет  $10^{10^{10}}$  раз! в итоге, в конце инфляционной стадии исходная флуктуация плотности, имевшая планковский масштаб ( $10^{-35}$  м), вырастает до колоссальных размеров, во много раз превышающих размер доступной наблюдениям современной Вселенной. Это объясняет однородность и изотропию, а также плоскую геометрию Вселенной — она представляет собой лишь крошечную часть чего-то гораздо*

*большого, подобно тому, как небольшой участок поверхности огромного шара в первом приближении можно считать плоским, хотя сам шар, естественно, сильно искривлен».*

Гравитационные силы отталкивания в инфляционный период разгоняют материю, а затем она движется по инерции. Так формируется хаббловский закон расширения Вселенной.

#### 5.4.2. Стадия нуклеосинтеза

Когда температура Вселенной понижается до  $10^{16} - 10^{17}$  К, в горячей плазме, наполняющей Вселенную, происходит электрослабый фазовый переход. До этого момента электромагнитные и слабые взаимодействия с участием нейтрино являются единым электрослабым взаимодействием. После этого фазового перехода бозоны  $W^\pm$  и  $Z^0$  — переносчики электрослабого взаимодействия — приобретают массу (срабатывает хиггсовский механизм динамического рождения массы) и, следовательно, слабое взаимодействие становится короткодействующим и очень слабым. В эту эпоху слабые и электромагнитные взаимодействия, бывшие до этого момента времени едиными, расщепляются на обычные электромагнитные, основным квантом которых является фотон, и слабые взаимодействия с участием нейтрино, основными квантами которых являются  $W^\pm$ - и  $Z^0$ -бозоны.

В свободном состоянии кварки могут существовать только в очень горячей плазме с температурой  $T > 10^{11}$  К. В ранней Вселенной, когда температура была значительно больше этой величины, адронов — протонов и нейтронов, — не было, существовал «кварковый суп» — кварк-глюонная плазма. В результате расширения Вселенной температура падает, кварки начинают соединяться, образуя протоны и нейтроны, и как свободные частицы уже не встречаются в природе. Примерно при температуре  $T < 10^{11}$  К происходит *конфаймент* — «пленение» кварков в адронах.

После эпохи образования протонов и нейтронов наиболее замечательной является эпоха нуклеосинтеза. Она начинается через 1 секунду после Большого Взрыва и продолжается вплоть до  $t \sim 100$  секунд. В этот период, кроме уже существовавших ядер водорода, т. е. одиночных протонов (примерно 75 % всего вещества), синтезируются легкие ядра, такие как гелий-4  ${}^4\text{He}$  (25 % всего вещества), и совсем незначительные количества дейтерия  ${}^2\text{H}$ , гелия-3  ${}^3\text{He}$ , лития  ${}^7\text{Li}$ , т. е. начинает рождаться привычное нам вещество.

Все более тяжелые ядра будут синтезироваться позже в звездах в ходе термоядерных реакций и во взрывах сверхновых.

Предсказание количеств водорода и гелия ( $H \simeq 75\%$ ,  ${}^4\text{He} \simeq 25\%$ ), а также количеств остальных легких элементов, достаточно хорошо согласующихся с наблюдениями, является основным результатом теории нуклеосинтеза. Стадия нуклеосинтеза является заключительной стадией, которая относится к ранней Вселенной. Она заканчивается примерно через 3 минуты после Большого Взрыва. Эпохи в жизни нашей Вселенной, следующие за эпохой нуклеосинтеза, представляют интерес уже с точки зрения космологии современной Вселенной.

Вслед за эпохой нуклеосинтеза следует стадия, играющая важную роль в космологии, — эпоха доминирования (преобладания) темной материи, которая наступает примерно при температуре  $T \simeq 10^5$  К. Без этой массы вещество Вселенной было бы распределено настолько равномерно, что не образовалось бы никаких наблюдаемых структур. Однако, начиная с этой эпохи, растут *флуктуации плотности* — малые возмущения плотности вещества, которые в итоге приводят к формированию звезд, галактик, скоплений и сверхскоплений.

Затем наступает эпоха рекомбинации водорода, в процессе которой протоны и электроны объединяются и образуется водород. Эпоха рекомбинации совпадает с эпохой «просветления» Вселенной — заряженная плазма, поглощающая излучение, исчезает, и вещество становится прозрачным. Температура этой эпохи известна очень хорошо из лабораторной физики  $T \simeq 3000$  К. После рекомбинации фотоны доходят до наблюдателя, практически не взаимодействуя с веществом по дороге, составляя реликтовое излучение. Родившись примерно через 380 тысяч лет после Большого Взрыва при температуре около 3000 К, за счет расширения Вселенной реликтовое излучение имеет энергетический спектр, который соответствует в настоящее время спектру абсолютно черного тела, нагретого до температуры 2,75 К. Вселенная с момента «просветления» увеличилась примерно в 1000 раз.

## 5.5. Простейшая космологическая модель и судьба Вселенной

В эволюции Вселенной ключевую роль играет гравитация, поэтому для изучения такой эволюции в различных космологических моделях необходимо использовать уравнения Общей теории относительности. Однако,

используя простейшую космологическую модель Вайнберга–Зельдовича (см. [24]), мы сможем, без обращения к ОТО, применяя только законы классической, ньютоновской гравитации, качественно получить основные варианты эволюции Вселенной.

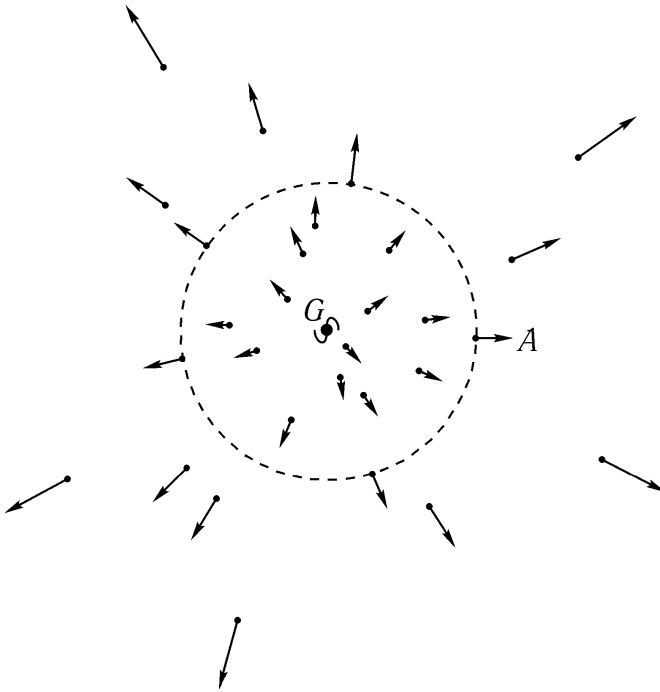


Рис. 5.20. Простейшая космологическая модель

Показан ряд галактик со скоростями по отношению к данной галактике  $G$ , отмеченными длинами и направлениями сплошных стрелок. (В соответствии с законом Хаббла эти скорости взяты пропорциональными расстоянию до  $G$ .) Рисунок из книги С. Вайнберга «Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной» (М.: РХД, 2006).

Чтобы рассчитать движение любой галактики по отношению к нашей галактике, нарисуем сферу радиуса  $R$  с нашей галактикой в центре и интересующей нас галактикой на поверхности (рис. 5.20). И в ньютоновской теории гравитации, и в ОТО движение этой галактики будет таким, как будто масса Вселенной состоит только из вещества внутри сферы, а снаружи нет ничего.



Масса такой сферы равна ее объему, умноженному на среднюю плотность Вселенной  $\rho$ :

$$M = \frac{4\pi R^3 \rho}{3}.$$

Из классической теории тяготения следует, что потенциальная энергия любой типичной галактики на поверхности этой сферы составляет

$$E_{\text{пот}} = -\frac{mMG}{R} = -\frac{4\pi m R^2 \rho G}{3},$$

где  $m$  — масса галактики,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$  — гравитационная постоянная. Скорость этой галактики определяется законом Хаббла в виде

$$v = H \cdot R.$$

Следовательно, кинетическая энергия этой галактики равна

$$E_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{mH^2 R^2}{2}.$$

Полная энергия галактики есть сумма кинетической и потенциальной энергий:

$$E = E_{\text{кин}} + E_{\text{пот}} = \frac{mH^2 R^2}{2} - \frac{4\pi m R^2 \rho G}{3} = \frac{3mR^2}{4\pi G} \left( \frac{3H^2}{8\pi G} - \rho \right).$$

Эта величина должна оставаться постоянной в процессе расширения Вселенной.

Если полная энергия  $E$  отрицательна, доминирует отрицательная энергия притяжения, галактика никогда не может удалиться в бесконечность. Постепенно движение галактики будет замедляться, и рано или поздно галактика начнет приближаться. Если же полная энергия  $E$  положительна, доминирует кинетическая энергия, галактика может достичь бесконечности. А если энергия  $E$  строго равняется нулю, т. е. потенциальная энергия равна кинетической, после некоторого удаления галактика остановится.

Возникшая в формуле величина с размерностью плотности

$$\frac{3H^2}{8\pi G} = \rho_{\text{крит}}$$

называется *критической плотностью*  $\rho_{\text{крит}}$ . Численно критическая плотность составляет  $\rho_{\text{крит}} \approx 10^{-26} \text{ кг/м}^3$ . Такое значение плотности примерно соответствует наличию 6 протонов в каждом кубическом метре пространства.

Полученные выше результаты можно распространить на все галактики. Тогда возможны следующие варианты развития Вселенной:

### 1. Сценарий «Большое сжатие»

Средняя плотность вещества (а точнее энергии-массы) во Вселенной  $\rho$  больше критической плотности  $\rho_{\text{крит}}$ ; в этом случае полная энергия  $E < 0$  и расширение Вселенной сменится сжатием; Вселенная коллапсирует, в конце концов схлопываясь в сингулярность.

В некоторых моделях после образования сингулярности возможен новый Большой Взрыв, и история Вселенной может оказаться циклической;

### 2. Сценарий «Большой мороз»

Средняя плотность энергии-массы во Вселенной  $\rho$  в точности равна критической плотности  $\rho_{\text{крит}}$ , при этом  $E = 0$  и Вселенная будет расширяться вечно с постепенно приближающейся к нулю скоростью. Со временем все звезды проэволюционируют и погаснут и во Вселенной останутся только потухшие звезды, нейтронные звезды и черные дыры. Температура упадет почти до абсолютного нуля, и жизнь станет невозможна. В частности, такая ситуация имеет место и в случае стационарной Вселенной;

### 3. Сценарий «Большой разрыв»

Средняя плотность энергии-массы во Вселенной  $\rho$  меньше критической плотности  $\rho_{\text{крит}}$ , тогда  $E > 0$  и расширение Вселенной будет продолжаться бесконечно. Скорость будет все нарастать, и начиная с определенного момента сила, расширяющая Вселенную, сначала превысит гравитационные силы, удерживающие галактики в скоплениях. За ними распадутся галактики и звездные скопления. И, наконец, последними распадутся наиболее тесно связанные звездные системы. Спустя некоторое время электромагнитные силы не смогут удерживать от распада планеты и более мелкие объекты. Мир вновь будет существовать в виде отдельных атомов. На следующем этапе распадутся и отдельные атомы. Что последует за этим, точно сказать невозможно: на этом этапе перестает работать современная физика.

Из наблюдений известно, что, помимо обычного вещества (из которого состоят звезды, планеты, межзвездный газ и нейтрино всех сортов), вклад в общую плотность энергии-массы дают темная материя и темная энергия. При этом доля обычного вещества составляет всего около 5%, а масса звезд и планет всего около 0,5%.

**Темная материя** — вещество, не взаимодействующее с электромагнитным излучением и состоящее из неизвестных пока частиц. Это свойство делает невозможным прямое наблюдение темной материи. Доля темной материи составляет около 25%.

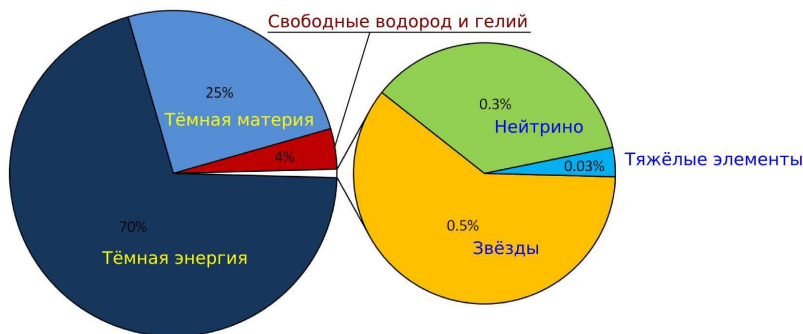


Рис. 5.21. Состав Вселенной по данным космической обсерватории Планк

**Темная энергия** — отвечает за ускоренное расширение Вселенной. Удовлетворительных моделей темной энергии пока нет. В некоторых моделях ее пытаются связать с энергией вакуума. Доля темной энергии составляет около 70 %.

Измеренная плотность массы-энергии оказывается примерно равной критической, а точность измерений не позволяет пока выбрать определенный сценарий дальнейшей судьбы Вселенной.

\* \* \*

За XX-ый в. космология превратилась из набора догматических и схоластических суждений в точную науку. Она строится на фундаменте современной теоретической физики и использует огромный массив всех доступных наблюдательных данных. В последние годы поразительный прогресс космологии приводит к настолько сильным преобразованиям научной картины мира, что нередко говорят о новой революции в науке о Вселенной.

## Вопросы для самоконтроля

1. Расскажите об основных вехах развития космологических представлений человечества.
2. Сформулируйте закон Хаббла.
3. Какой возраст имеет Вселенная?
4. Что такое барионная асимметрия?
5. Что такое реликтовое излучение? Какими свойствами оно обладает?
6. Сформулируйте космологический принцип.
7. Назовите основные этапы развития Вселенной.

# Литература

1. Попов С. Суперобъекты: Звезды размером с город. Библиотека ПостНауки. М.: Альпина нон-фикшн, 2016. 241 с.
2. Киппенхан Р. 100 миллиардов солнц: Рождение, жизнь и смерть звезд. М.: Мир, 1990. 297 с.
3. Глэшоу Ш. Очарование физики. М.: РХД, 2002. 337 с.
4. Дьюрелл К. Азбука теории относительности. М.: Мир, 1970. 160 с.
5. Гарднер М. Теория относительности для миллионов. М.: Атомиздат, 1967. 190 с.
6. Сасскинд Л. Битва при черной дыре. Мое сражение со Стивеном Хокингом за мир, безопасный для квантовой механики. СПб.: Питер, 2013. 448 с.
7. Хокинг С. Черные дыры и молодые вселенные. СПб.: Амфора, 2006. 191 с.
8. Торн К. Черные дыры и складки времени. Дерзкое наследие Эйнштейна. М.: Физматлит, 2008. С. 617.
9. Окунь Л. Б.  $\alpha \beta \gamma \dots Z$ . Элементарное введение в физику элементарных частиц. М.: Наука, 1985. 113 с. Библиотечка «Квант». № 45.
10. Окунь Л. Б. Элементарное введение в физику элементарных частиц. М.: Физматлит, 2009. 127 с.
11. Хокинг С. Краткая история времени: От большого взрыва до черных дыр. СПб.: Амфора, 2003. 213 с.
12. Петров А. Н. Гравитация. От хрустальных сфер до кротовых нор. М.: Век 2, 2013. 319 с.
13. Сасскинд Л. Космический ландшафт. Теория струн и иллюзия разумного замысла Вселенной. СПб.: Питер, 2015. 448 с.

14. Smolin L. The trouble with physics: the rise of string theory, the fall of a science, and what comes next. London: Penguin Books, 2008. 257 p. Русский перевод: Смолин Л. Неприятности с физикой: взлет теории струн, упадок науки и что за этим следует. URL: <http://www.rodon.org/sl/nsfvtsunichzes/>.
15. Карцев В. П. Приключения великих уравнений. Жизнь замечательных идей. М.: Знание, 1986. 289 с.
16. Эшкрофт Ф. Искра жизни. Электричество в теле человека. М.: Альпина нон-фикшн, 2015. 394 с.
17. Фейнман Р. КЭД — странная теория света и вещества. М.: АСТ, 2014. 192 с.
18. Мигдал А. Б. От догадки до истины. М.: Просвещение, 2008. 175 с.
19. Вайнберг С. Мечты об окончательной теории. М.: УРСС, 2004. 258 с.
20. Компанец А. С. Симметрия в микро- и макромире. М.: Наука, 1978. 208 с.
21. Решетников В. П. Почему небо темное. Как устроена Вселенная. М.: Век 2, 2012. 192 с.
22. Виленкин А. Мир многих миров: Физики в поисках параллельных вселенных. М.: Астрель, 2010. 303 с.
23. Рубин С. Г. Устройство нашей Вселенной. Наука для всех. М.: Век 2, 2006. 316 с.
24. Вайнберг С. Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной. М.: РХД, 2006. 267 с.

Учебное издание

**Мартынов** Михаил Викторович  
**Румянцев** Дмитрий Александрович

## **ФИЗИЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ**

Учебное пособие

Редактор, корректор Л. Н. Селиванова  
Компьютерный набор и верстка М. В. Мартынова, Д. А. Румянцева

Подписано в печать 12.04.2016. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 5,58. Уч.-изд. л. 5,0.

Тираж 62 экз. Заказ

Оригинал-макет подготовлен  
в редакционно-издательском отделе ЯрГУ.  
Ярославский государственный университет.  
150000, Ярославль, ул. Советская, 14.

Отпечатано в типографии ООО «Филигрань».

г. Ярославль, ул. Свободы, д. 91.

Тел. (4852) 982705, [pechataet@bk.ru](mailto:pechataet@bk.ru)