

УДК 52
ББК 22.6
P82

Рубин Сергей Георгиевич — доктор физико-математических наук, профессор Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

Область научных интересов — космология, многомерная гравитация, черные дыры.

Рубин, Сергей Георгиевич.

P82 Устройство нашей Вселенной / С. Г. Рубин. — 4-е изд. — 326 с. — Москва : ДМК Пресс, 2022. — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-89818-123-9

В книге излагаются современные взгляды на происхождение и эволюцию Вселенной. Почему законы природы такие, какими мы их наблюдаем. Могли ли они быть другими, и к чему бы это привело. Что ждет в будущем мир, в котором мы живем, и возможно ли существование других вселенных. Существуют ли цивилизации на других планетах. Как ученые получают информацию о процессах, происходивших миллиарды лет назад, и почему они уверены в их правильности.

УДК 52
ББК 22.6

На обложке: Планетарная туманность «Кошачий глаз», обработанное изображение (телескоп «Хаббл», НАСА).

На 4-й стр. обложки: Результат численных расчетов для аналога кротовой норы, предложенного автором. Исходное пространство 6-мерное. Справа и слева от точки перехода — макроскопические двумерные подпространства.

ISBN 978-5-89818-123-9

© Переиздание. ДМК Пресс, 2022
© Оформление. Век 2, 2007

Содержание

| | |
|---|-----------|
| Предисловие | 6 |
| Введение | 8 |
| Глава 1. Ингредиенты Вселенной | 11 |
| О здравом смысле и научном подходе..... | 13 |
| Прямые и косвенные измерения..... | 14 |
| Элементарные частицы | 17 |
| Античастицы | 19 |
| Виды взаимодействий | 20 |
| Электромагнитное взаимодействие..... | 21 |
| Гравитационное взаимодействие..... | 24 |
| Слабое взаимодействие | 24 |
| Сильное взаимодействие | 25 |
| Модель Вайнберга–Салама. Успехи и проблемы..... | 26 |
| Квантовая теория..... | 29 |
| Поля..... | 32 |
| Макрообъекты | 37 |
| Эффект Доплера..... | 40 |
| Закон Хаббла | 42 |
| Компактные объекты..... | 46 |
| Звезды..... | 46 |
| Белые карлики..... | 47 |
| Нейтронные звезды..... | 48 |
| Черные дыры..... | 49 |
| Квезары..... | 51 |
| Темная материя..... | 52 |
| Поиски темной материи..... | 53 |

| | |
|---|------------|
| Эффект линзирования..... | 55 |
| Эффект Доплера..... | 56 |
| Горячие газовые облака..... | 57 |
| Носители темной материи..... | 58 |
| Разнообразие MACHOs..... | 58 |
| Как обнаружить MACHOs?..... | 59 |
| Неуловимые WIMPs..... | 60 |
| Темная материя – холодная или горячая?..... | 62 |
| Темная энергия – энергия вакуума?..... | 65 |
| Топологические дефекты..... | 66 |
| Про кротовые норы..... | 69 |
| Глава 2. Прошлое, настоящее и будущее..... | 72 |
| Как из искры возгорелось пламя..... | 72 |
| Основные проблемы Большого взрыва..... | 72 |
| Период сверхбыстрого расширения Вселенной..... | 79 |
| Основные вопросы к инфляции..... | 82 |
| Странные наблюдатели..... | 89 |
| Красное смещение..... | 93 |
| Молодые годы..... | 96 |
| Рождение барионов..... | 97 |
| Эти опасные античастицы..... | 97 |
| Появление гелия..... | 101 |
| Космологический нуклеосинтез..... | 101 |
| Первичные флуктуации..... | 108 |
| Состав Вселенной до первых звезд..... | 110 |
| Закон Хаббла..... | 113 |
| Реликтовое излучение..... | 115 |
| Прогнозы на будущее..... | 119 |
| Многомерное пространство..... | 124 |
| Про время..... | 128 |
| Глава 3. Жизнь галактик..... | 131 |
| Звезды – основной объект..... | 131 |
| Солнце..... | 135 |
| Эволюция звезд..... | 139 |

| | |
|--|------------|
| Сверхновые | 145 |
| Белые карлики | 149 |
| Нейтронные звезды | 152 |
| Черные дыры | 159 |
| Механизм рождения первичных черных дыр | 165 |
| Джеты | 167 |
| Квazarы | 171 |
| «Ненужное» открытие | 171 |
| Квazar – яркая черная дыра? | 173 |
| Нежелательные соседи | 178 |
| Переменная яркость | 179 |
| Поставщики информации | 180 |
| Родственники | 181 |
| Планеты | 181 |
| Межзвездная среда | 185 |
| Области антиматерии | 186 |
| Космические лучи | 188 |
| Гамма-всплески | 192 |
| Галактики | 194 |
| Млечный путь | 199 |
| Эволюция галактик | 202 |
| Глава 4. Инструментарий | 206 |
| Детекторы электромагнитного излучения | 209 |
| Радиотелескопы | 209 |
| Инфракрасные телескопы | 210 |
| Оптические телескопы | 210 |
| Детекторы рентгеновского и гамма-излучения | 212 |
| Кванты-гиганты | 220 |
| Нейтронные детекторы | 221 |
| Лайман-альфа лес | 224 |
| Глава 5. Конструктор вселенных | 226 |
| Антропный принцип | 229 |
| Создаем Вселенную | 235 |
| Звезды созданы, что дальше? | 251 |

| | |
|---|------------|
| Почему правильные теории кажутся красивыми?..... | 257 |
| Случайный потенциал..... | 260 |
| Роль флуктуаций в эволюции систем..... | 266 |
| Живые системы..... | 266 |
| Мутации..... | 267 |
| Экономика..... | 267 |
| Образование планет..... | 268 |
| Научная деятельность..... | 269 |
| Замечание напоследок..... | 270 |
| Глава 6. Жизнь цивилизаций..... | 271 |
| Заключение..... | 285 |
| Основные проблемы физики..... | 285 |
| Лженаука и что с этим можно поделать..... | 287 |
| Краткий самоучитель..... | 288 |
| Опасности и как их избежать..... | 289 |
| О лжеученых..... | 290 |
| О пользе лженауки..... | 291 |
| Приложения..... | 293 |
| 1. Принцип неопределенности и размер атома..... | 293 |
| 2. Пространство де Ситтера..... | 294 |
| 3. Масса Джинса..... | 297 |
| 4. Инфляция – первые мгновения жизни Вселенной..... | 298 |
| 5. Взаимосвязь свойств пространства–времени и материи..... | 305 |
| 6. Сверхсветовые скорости джетов?..... | 308 |
| 7. Расширение пространства и динамика частиц..... | 309 |
| 8. Масса белого карлика и принцип Паули..... | 310 |
| 9. Разрушительное влияние приливных сил..... | 312 |
| Словарь терминов..... | 314 |
| Литература..... | 320 |

Все проще, чем вы думаете,
и одновременно сложнее,
чем вы можете вообразить.

Иоганн Вольфганг Гете

Предисловие

Космология, наука о происхождении и эволюции Вселенной, все больше привлекает внимание и, несмотря на обширную литературу, интерес к новым публикациям не пропадает. Это связано, во-первых, с быстрым развитием космологии и, во-вторых, с тем, что каждая научно-популярная статья или книга ограничивается определенным набором тем, связанных с предпочтениями автора. Кроме того, разным читателям интересны разные аспекты проблемы и на разных уровнях сложности. Чтение научных статей и книг предполагает хорошее владение предметом. Научно-популярные же издания часто ориентируются на менее подготовленного читателя и ограничиваются перечислением фактов. Это само по себе интересно и действительно может увлечь читателя, но тот, кто интересуется причинами явлений, останется неудовлетворенным. В этой книге я постарался не только описывать явления — в конце концов, почти любую информацию легко найти в Интернете, — но и объяснять причины этих явлений. Не всегда это удавалось сделать просто, и тот, кто не хочет вдаваться в математические детали, вполне может их пропускать и двигаться дальше. Этот вариант учитывался

при написании книги: наиболее трудные в математическом аспекте вопросы вынесены в приложения. Наиболее важными представляются глава 2, где изложена современная модель рождения нашей Вселенной (Большой взрыв), и глава 5, где обсуждаются удивительные свойства Вселенной, приведшие к зарождению разумной жизни. В остальных главах изложено современное понимание основных явлений и объектов микро- и макромира, связанных с проблемами космологии.

В третьем издании добавлен небольшой раздел о прямых и косвенных измерениях, а также о том, когда гипотезу можно считать экспериментально доказанной.

Благодарности

Автор благодарен А. Беркову, Е. Григорьеву, Р. Конопличу и В. Решетову за интересные обсуждения и замечания, улучшившие текст книги. Я также благодарен своей жене Наташе и дочке Свете за моральную поддержку и живой интерес, проявленный к содержательной части текста.

После выхода первого издания в свет автор получил много советов и замечаний от своих читателей и коллег. Особенно хотелось бы поблагодарить В. И. Докучаева, Л. В. Драницкого, В. М. Емельянова, А. И. Луковникова, В. В. Самедова и В. Г. Сурдина за полезные замечания по улучшению содержания книги.

Введение

Современная космология – бурно развивающаяся область научных исследований. Это обусловлено удачным стечением обстоятельств: с одной стороны – прогрессом в технике, который привел к резкому росту количества и качества информации об устройстве Вселенной, с другой – множеством новых плодотворных идей в теоретической космологии. Количество научных и научно-популярных статей быстро растет – пропорционально объему получаемой информации.

Особенность космологии как науки об эволюции Вселенной состоит в том, что при разработке новых теоретических моделей приходится манипулировать практически всеми физическими дисциплинами одновременно: квантовая теория поля, физика элементарных частиц, ядер и атомов, статистическая физика, гравитация – вот далеко не полный перечень областей знания, взаимосвязи между которыми необходимо учитывать. Кроме того, все новые идеи проверяются на согласование с наблюдательными данными и уже известными законами. Нередко имеется несколько различных моделей, объясняющих наблюдательные данные, и лишь будущие исследования выявят верную.

Обозначения

В астрофизике массы объектов обычно измеряются в массах Солнца, обозначаемой M_{\odot} . Все скорости удобно измерять в скоростях света, так что скорость любой массивной частицы $v < 1$, а всюду в формулах полагается скорость света $c = 1$. Так, энергия покоящейся частицы просто равна ее массе, $E = m$, обе величины измеряются в электронвольтах (эВ). Связь полной энергии частицы с ее импульсом имеет вид $E = (p^2 + m^2)^{1/2}$. Для частиц, массой которых можно пренебречь (ультрарелятивистские частицы, нейтрино), а также фотонов используется формула $E = p$. Постоянную Больцмана k также во всех выражениях считаем равной единице, так что температура тоже измеряется в электронвольтах.

При этом для оценок полезно помнить, что температура 1 ГэВ – это примерно 10^{13} К, а применительно к массе, 1 ГэВ – примерно $2 \cdot 10^{-24}$ граммов.

Скорость света c , постоянная Планка \hbar и гравитационная постоянная G считаются фундаментальными константами. Из них можно «соорудить» величины с размерностью «время», «длина» и «масса» и измерять все величины в единицах планковской длины, планковского времени и массы Планка:

$$\text{Длина (см): } L_p = (\hbar G/c^3)^{1/2} = 1,616 \cdot 10^{-33};$$

$$\text{Время (с): } T_p = (\hbar G/c^5)^{1/2} = 5,391 \cdot 10^{-44};$$

$$\text{Масса (г): } M_p = (\hbar c/G)^{1/2} = 2,177 \cdot 10^{-5}.$$

Эта так называемая планковская система единиц оказывается удобной в теоретических исследованиях. Читатель, не привыкший к переходу от одних единиц измерения к другим, может не заботиться об этих деталях, а просто следить за самими величинами, поверив, что все эти переходы сделаны правильно.

Полезно привести таблицу характерных астрономических расстояний.

Радиус Земли – $6,4 \cdot 10^8$ см.

Радиус Солнца – $6,9 \cdot 10^{10}$ см.

Расстояние от Земли до Луны – $3,8 \cdot 10^{10}$ см.

Расстояние от Земли до Солнца – $1,5 \cdot 10^{13}$ см.

Расстояние от Земли до ближайшей звезды (Проксима Кентавра) – $4,0 \cdot 10^{18}$ см.

Радиус нашей Галактики – $2,3 \cdot 10^4$ парсек.

Расстояние до соседней галактики Магеллановы Облака – $5 \cdot 10^4$ парсек.

Размер видимой части Вселенной – 6000 мегапарсек, или 10^{28} см.

1 световой год – $0,95 \cdot 10^{18}$ см.

1 парсек – $3,1 \cdot 10^{18}$ см.

Парсек (пк) – это расстояние, с которого большая полуось земной орбиты видна под углом, равным 1 секунде.

Светимости объектов часто нормируются на светимость Солнца $L_{\odot} = 4 \cdot 10^{33}$ эрг/с, а массы объектов выражаются в массах Солнца $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33}$ граммов.

Возраст нашей Вселенной примерно 13,8 млрд лет.

Ингредиенты Вселенной

Эксперт — это человек, который больше уже не думает; он знает.

Кин Хаббард

С тех пор, как человек стал проявлять интерес к окружающему миру не только с точки зрения основных инстинктов, его понимание природы непрерывно совершенствовалось. Человек узнавал о новых объектах, составляющих мир, в котором мы живем, об их взаимосвязях. Круг знаний постоянно расширялся, но, как заметил еще Пифагор, вместе с тем увеличивалась и область соприкосновения с неведомым. Каждый раз, как только ученым удавалось объяснить какое-либо явление, возникало несколько новых, еще более сложных вопросов. Это напоминало бой былинного богатыря с драконом, у которого после удаления одной головы вырастают три новые, причем еще более неприятные.

К счастью, в науке новые головы-вопросы вырастают не на одном и том же месте. Любая теория, которая является не чем иным, как ответом на очередной вопрос, и в дальнейшем остается правильной. Уточняется лишь область ее применимости. Постепенно усложняются наши представления о Вселенной, ее устройстве и взаимоотношениях частей, ее составляющих.

Долгое время Вселенная рассматривалась как некий контейнер, в который каким-то образом помещены объек-

ты для изучения – частицы, планеты, звезды и т. д. Делом ученых было описание этих объектов и их взаимодействия друг с другом. Первые облачка, бросающие тень на эту идиллическую картину, появились после открытия русского математика и геофизика А. А. Фридмана, обнаружившего, что стационарное состояние Вселенной неустойчиво, и она должна либо расширяться, либо сжиматься. Если, конечно, верна общая теория относительности Эйнштейна. Скорость расширения или сжатия Вселенной оказалась зависящей от средней плотности вещества в ней. Свойства «ящика» зависят от его содержимого? Странно...

Дальнейшие исследования привели к выводу о том, что наблюдаемая сейчас область Вселенной около 14 млрд лет назад имела размер порядка 10^{-27} см или меньше. А это на 19 порядков меньше размера атома. Понятно, что в такой маленькой области не могло существовать все обилие частиц, составляющих звезды. Следовательно, Вселенная и частицы рождались одновременно! И, конечно же, влияли друг на друга.

Сейчас уже ясно, что наша Вселенная – это не «кастрюля с супом», в которой могло находиться любое содержимое, а сложный организм, все части которого, большие и малые, сложнейшим образом переплетены и взаимообусловлены. Поэтому неудивительно, что космология стала тем оселком, на котором оттачиваются наши знания о природе. Ведь здесь связаны и теория элементарных частиц, и общая теория относительности (ОТО), и статистическая физика.

Мы живем в удивительное время: предыдущие поколения не представляли себе всю судьбу Вселенной, возможные варианты ее истории, ее прошлого и будущего. Они изучали только то, что видели в данный момент. Только сейчас становится понятным общий ход эволюции Вселенной, начиная с момента ее рождения и далее в будущее. Конечно, детали, и существенные детали, еще не ясны, но практически все возможные варианты эволюции нашей Вселенной уже названы.

О здравом смысле и научном подходе

К сожалению, «знание порождает печали», и расплатой за прогресс в науке является отсутствие наглядности. Наши мозги в течение миллионов лет подстраивались к очень специфическим условиям: небольшим скоростям, много меньше скорости света, большим телам, для которых квантовые явления не существенны, трехмерному пространству. В то же время новые теории базируются на общей теории относительности, квантовой теории и часто — на многомерности пространства. Наука усложнилась настолько, что мозг не в состоянии вообразить новые явления. Как же отделять зерна от плевел, правду от вымысла, если нельзя опираться на здравый смысл, т. е. на те понятия, которыми наш мозг привык оперировать? Здесь на помощь приходит научный метод, который состоит в следующем.

Предположим, что имеется некое явление, например, квазары, которое необходимо объяснить. Прежде всего, следуя научному методу, вводят исходный постулат, который не доказывается, что и честно признается. В нашем случае для объяснения явления вводится предположение о существовании массивных черных дыр в центрах галактик. Конечно же, постулаты вводятся так, чтобы успешно объяснить конкретное явление. Но далее начинается самое главное: введенный постулат, во-первых, не должен противоречить никаким известным природным явлениям и, во-вторых, должен предсказывать новые явления, проверяемые экспериментально. Если выводы, вытекающие из предположения, согласуются с опытными данными, то оно считается верным, несмотря на всю его парадоксальность. С этой точки зрения предположение о черных дырах в центрах галактик является хорошо обоснованным, и довод, что «никто там не был и не видел черную дыру», научным не является. Ведь и электрон никто не видел! Разница в том, что предположение о его существовании помогает объяснить множество явлений, и наш мозг просто привык к электронам. Наш мозг — «ретроград», и многое, что ему

сначала кажется невозможным, со временем становится привычным. Предположение о массивных черных дырах в центрах галактик точно так же объясняет многие явления и поэтому должно считаться верным.

Поэтому всякий раз, когда вам хочется воскликнуть: «Этого не может быть!» – подумайте: а почему, собственно? Чему это противоречит? Если только так называемому «здравому смыслу», то этого уже недостаточно.

Прямые и косвенные измерения

Зададимся странным вопросом: что имеет в виду человек, утверждая, что он открыл новое явление? Например, Галилей открыл, что ускорение тел под действием силы тяжести не зависит от их массы. Для этого ему понадобились весы, часы и собственный мозг – для интерпретации полученных результатов. Как упомянуто выше, мозг человека оказывается слабым звеном, как только мы выходим за рамки привычных условий. Далеко не все, что мы видим и считаем очевидным, оказывается соответствующим действительности. Пример, лежащий на поверхности – обращение Солнца вокруг Земли. Если бы мы открыли правду человеку, жившему пару тысяч лет назад, он вряд ли бы нам поверил. Если бы мы продолжали настаивать, да еще попутно информировали его о правильной форме Земли, то навсегда подорвали бы свой авторитет. Его знание, полученное ПРЯМЫМ наблюдением, оказывается неверным, в отличие от нашего знания, полученного КОСВЕННЫМ образом (это к вопросу о том, что важнее – прямые или косвенные методы).

Получается, что прямые наблюдения не являются гарантией правильности выводов. Как же отличить зерна от плевел? Почему мы уверены, что открытие Галилея верно, а «открытие» обращения Солнца вокруг Земли ложно? Потому что открытие Галилея проверялось много раз, и, что главное, в совершенно разных условиях. Кроме того, это открытие лежит в основе теории тяготения – уравнений, разработанных Ньютоном и также проверенных множе-



Один из многих примеров обмана зрения. Правый кружок кажется явно темнее левого, хотя на самом деле они одинаковы.

ством способов – от падения яблок до траекторий снарядов и планет.

Как мы видим, для того, чтобы можно было говорить о состоявшемся открытии, совершенно необходим математический аппарат, описывающий не только данное явление, но и многие другие, хорошо проверенные ранее. Обычно, полученные уравнения позволяют также делать проверяемые предсказания. Все это образует самосогласованную «паутину», имея которую мы можем говорить о понимании данного круга явлений.

Еще пару-тройку веков назад новые законы были достаточно просты и легко проверяемы. Однако со временем все простые законы уже были сформулированы, и возросла роль косвенных измерений и их интерпретации в виде уравнений. В качестве примера, вернемся к вопросу: почему мы так уж уверены, что электроны существуют? Никто не видел, например, процесс фотоэффекта напрямую, только косвенные измерения! Да, стрелки амперметров и вольтметров отклоняются, заряженные тела притягиваются и отталкиваются, но какое это имеет отношение к микроскопическому объекту с массой $9.10938356 \cdot 10^{-31}$ кг и зарядом $-1.6021766208 \cdot 10^{-19}$ Кл? Гениальность Максвелла заключалась в том, что он придумал уравнения, объясняющие весь набор эффектов, связанных с электричеством и магнетизмом. Все дальнейшие проверки подтверждали пра-

вильность этих уравнений и именно поэтому мы можем говорить о своем понимании данного круга явлений.

Промежуточный вывод: наше знание законов природы основано на неразрывной связи уравнений и наблюдений, и не важно — «прямых» или «косвенных».

Поскольку добывание знаний становится все более сложным процессом, роль косвенных наблюдений начинает доминировать. Совместно с уравнениями они дают нам уверенность в правильности нашего понимания законов природы. Например, можно задать вопрос, почему мы уверены в правильности идеи инфляции, т.е. сверхбыстрого расширения Вселенной в первые моменты ее рождения? Мы же не присутствовали при этом? Однако вспомним, что и при конкретном акте взаимодействия электрона с атомом твердого тела мы тоже не присутствуем. В обоих случаях мы черпаем уверенность в совпадении предсказаний следствий, получаемых из уравнений, с косвенными измерениями. И чем больше совпадений, тем больше наша уверенность. (Интересно, кстати, когда эта уверенность превращается в 100%? — вопрос для размышлений¹).

Взаимосвязь уравнений и косвенных измерений становится особенно важной в современных научных исследованиях, когда условия выходят далеко за привычные для нашего восприятия рамки. Кроме известных примеров, связанных с квантовой механикой и специальной теорией относительности, существует и множество других. Остановлюсь на одном из примеров, который кажется подходящим для иллюстрации сказанного. Зададимся вопросом: можно ли поместить твердый тонкий стержень размером 1 метр внутри куба с гранью 1 см? Человек, далекий от науки и использующий свой мозг с его миллионлетним опытом, уверенно ответит «нет!». Даже если подсказать, что куб может находиться в пространстве с числом измерений, большее 3, он ответа не изменит. Нормальный человек этого просто не может представить! Однако уже индиви-

¹ См. в книге Е. Л. Фейнберг. Две культуры. Интуиция и логика в искусстве и науке. Фрязино. Век 2, 2004 (прим. ред.).

дуум, обремененный знанием теоремы Пифагора, поймет, что при достаточно большом числе измерений эта теорема дает положительный ответ! Чему верить – своему опыту или теореме Пифагора, проверенной в 3-мерном пространстве и обобщенной на многомерное? Ответ на этот вопрос отличает ученого от человека, с наукой не связанного.

Еще одна любопытная ветвь рассуждений возникает, если задаться следующим вопросом. Предположим, в нашем распоряжении замечательная теория, которая объясняет все явления в области ее ответственности. Предположим теперь, что наша теория предсказывает некое явление, которое *никогда* не будет проверено. Например, вполне возможно, что мы никогда не сможем получить информацию о внутренней геометрии черной дыры, хотя ОТО описывает движение тел внутри черной дыры и, в частности, предсказывает невозможность обратного вылета тела. Вопрос к читателю: существует ли это явление «на самом деле»? Научного ответа на этот вопрос, насколько я знаю, нет...

Физические сущности настолько переплетены, что если глубоко изучать одну из них, непременно приходится учиться и все остальные. Как уже говорилось, это особенно относится к космологии, науке о рождении и эволюции Вселенной. Поэтому минимальный экскурс по основным направлениям физики необходим. Начнем с малых мира сего, а самые малые – это, конечно

Элементарные частицы

Основными свойствами частиц являются масса, заряд и спин. Распределение частиц по массам, как кажется, не подчиняются никаким правилам. Заряды же частиц кратны массе электрона, за исключением кварков, заряд которых кратен $1/3$ заряда электрона. Под понятием «спин» можно понимать внутренний момент вращения частицы. Спин частиц пропорционален постоянной Планка \hbar . Оказывается, что свойства частиц кардинальным образом зависят от

того, целому или полуцелому числу постоянных Планка кратен их спин. Если это число целое (0, 1, 2...), то такие частицы называются бозонами, а если полуцелое (1/2, 3/2, 5/2...) – фермионами.

Еще одно крупное различие частиц – по их отношению к сильному взаимодействию. О сильных взаимодействиях, как и об остальных, написано ниже. Частицы, участвующие в процессах с сильным взаимодействием, называются кварками (из них состоят все барионы – протон, нейтрон и т.д.), остальные, не участвующие в сильных взаимодействиях, – лептонами. Ниже в таблице приведены их характеристики. Для кварков приведены также русские названия. Физики обычно пользуются английскими.

Фермионы, спин = 1/2

| Лептоны | | | Кварки | | |
|--------------------------------|-------------|-------|--------------------------|------------|-------|
| Обозначение и название | Масса, ГэВ | Заряд | Обозначение и название | Масса, ГэВ | Заряд |
| ν_e , электронное нейтрино | $< 10^{-8}$ | 0 | u – up | 0,003 | 2/3 |
| e, электрон | 0,000511 | -1 | d – down | 0,006 | -1/3 |
| ν_μ , мюнное нейтрино | $< 0,0002$ | 0 | c – charm (очарование) | 1,3 | 2/3 |
| μ , мюон | 0,106 | -1 | s – strange (странность) | 0,1 | -1/3 |
| ν_τ , тау-нейтрино | $< 0,02$ | 0 | t – top | 175 | 2/3 |
| τ , тау-лептон | 1,7771 | -1 | b – bottom | 4,3 | -1/3 |

Наиболее важными бозонами, т.е. частицами с целым спином, являются: фотон, глюоны (8 штук), W^\pm бозоны, Z-бозон и гипотетический гравитон. Существование последнего экспериментально не подтверждено – уж слишком слабо он должен взаимодействовать с материей.

В современной теории поля частицы – это мелкомасштабные волны соответствующих полей. Так, электромагнитное излучение может восприниматься и как волны (радиоволны), и как частицы (фотоны). Если, например, уменьшать интенсивность потока излучения, падающего на измерительное устройство, то начиная с некоторого уров-

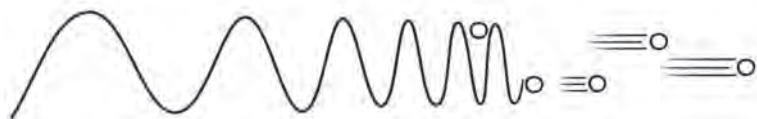


Рис. 1.1. Электромагнитное поле представляется в виде волны. Быстро осциллирующая волна детектируется как группа фотонов.

ня, прибор будет регистрировать не непрерывное излучение, а отдельные кванты. В этом случае уже говорят не о длине волны, а об энергии фотона. Известно, что энергия фотонов ε и соответствующая ей длина волны электромагнитного излучения λ обратно пропорциональны друг другу, $\varepsilon = 2\pi\hbar c/\lambda$. Так, красный свет имеет длину волны примерно 700 нанометров, чему соответствуют фотоны с энергией 1,8 эВ. Вселенную пронизывают фотоны различных энергий, и в частности, с энергиями в тысячи и миллионы электронвольт.

Античастицы

В свое время П. М. Дирак заметил, что уравнения, описывающие движение элементарных частиц, описывают также движение частиц-двойников, обладающих той же массой, но противоположным зарядом. Как обычно, было два пути: либо найти эти частицы в эксперименте, либо искать другие уравнения. От уравнений отказываться не хотелось – уж больно элегантно они выглядели. К счастью, оказалось, что такие частицы действительно существуют! Каждой частице соответствует своя античастица. Выяснилось, что все законы природы с очень высокой точностью (но не абсолютно) одинаковы для частиц и античастиц.

Характерной и важной для нас особенностью частиц и античастиц является то, что при столкновении они взаимоуничтожаются (аннигилируют). Не бесследно, конечно, – закон сохранения энергии и импульса справедлив и в мире элементарных частиц. Чаще всего конечным продуктом аннигиляции являются фотоны. Кинетическая энергия ча-

стицы и античастицы, а также энергия, содержащаяся в их массе, полностью переходит в энергию фотонов. Например, после столкновения двух однограммовых кусочков вещества и антивещества выделилось бы в виде фотонов примерно 10^{15} Дж энергии. Это много. Таким количеством энергии можно, в случае нужды, приготовить 30 млн тонн кипятка.

Понятна также и причина того, что античастиц вокруг нас нет: просто все они исчезли при столкновении с частицами. Однако тут же всплывает другой вопрос: а почему тогда остались частицы? Действительно, если основные уравнения для них одинаковы, то и частиц быть не должно, одни фотоны. Вот это уже серьезный вопрос, который не прояснен до конца и поныне. Конечно, существует много вариантов ответа, и позже мы поговорим об этом, но который именно вариант верен, пока неизвестно.

Виды взаимодействий

Нельзя хлопнуть в ладоши одной рукой.

А. Навои

Кроме индивидуальных свойств частиц, необходимо знать форму их взаимодействия с другими частицами и друг с другом. Чтобы создать все многообразие явлений Природе понадобилось всего лишь четыре вида взаимодействия: слабое, электромагнитное, сильное (ядерное) и гравитационное. Сейчас уже более или менее понятно, что первые два имеют общее происхождение, есть серьезные основания полагать, что сильное взаимодействие будет к ним присоединено. И есть пока еще призрачная надежда, что в будущем все четыре вида взаимодействия будут объединены.

Почему же в обычных условиях, т.е. при низких энергиях, они действуют самостоятельно? Считается, что частицы взаимодействуют друг с другом путем обмена специфическими частицами — переносчиками взаимодействия и

главное в данном случае различие – их масса. Переносчики слабого взаимодействия примерно в 100 раз массивнее протона. Обмениваться ими трудно, в отличие от безмассовых фотонов, ответственных за электромагнитное взаимодействие. Но при высоких энергиях массы всех частиц равны нулю – об этом позаботилось поле Хиггса, которое ответственно за массы частиц. Значит и силы электромагнитного и слабого взаимодействий становятся примерно одинаковыми.

Некоторое представление о механизме Хиггса можно получить, если представлять себе частицы, движущиеся в некой вязкой жидкости. Чем больше вязкость, тем труднее ускорить частицу, и это воспринимается как увеличение ее массы. Ну а при высоких температурах вязкость жидкостей обычно уменьшается, и масса частиц вместе с ней.

Рассмотрим кратко каждое из этих взаимодействий и начнем с электромагнитного, как наиболее знакомого.

Электромагнитное взаимодействие

В 60-х годах XIX века Джеймс Максвелл вывел уравнения, описывающие всю совокупность магнитных и электрических явлений, тем самым показав, что они имеют единое происхождение. Сейчас мы уже понимаем, что все электромагнитные явления так или иначе связаны с излучением и поглощением фотонов. Этот вид взаимодействия, несомненно, необходим для того, чтобы образовывались сложные структуры. Само существование атомов и молекул обусловлено электромагнитным взаимодействием. Радио и телевидение удалось создать благодаря тому, что масса фотонов равна нулю, и они могут передавать взаимодействие на значительные расстояния. Основным актом взаимодействия считается испускание или поглощение одной частицы другой.

Для облегчения работы часто используют так называемые диаграммы Фейнмана. Например, рассеяние фотона на электроне (эффект Комптона) на языке диаграмм выглядит следующим образом (рис. 1.2): электрон на некоторое вре-

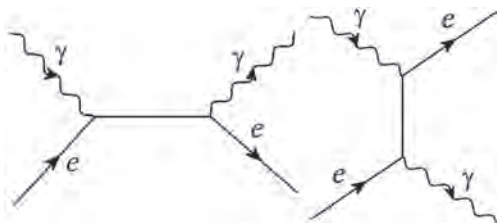


Рис. 1.2. Рассеяние фотона (обычно обозначается буквой γ) на электро-не (e).

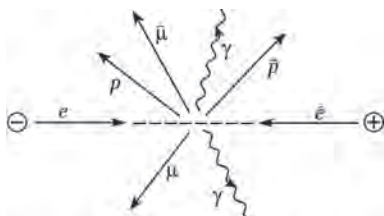
мя поглощает фотон, а затем излучает его, но уже с другим импульсом. Казалось бы, такая картина противоречит законам сохранения энергии и импульса, запрещающим поглощение фотона свободной частицей. Важное отличие состоит в том, что фотон поглощается после рождения через очень короткое время. Квантовая же механика допускает кратковременное нарушение закона сохранения энергии – см. формулу (1.2) на стр. 29.

На втором рисунке представлена смесь двух процессов. В одном – фотон превращается в электрон и позитрон (вертикальная линия). Позитрон взаимодействует с налетающим электроном, что приводит к образованию фотона в конечном состоянии. Второй процесс – электрон испускает фотон, после чего подхватывает налетающий фотон.

Поскольку законы сохранения энергии и импульса никто не отменял, суммарная энергия (импульс) начальных частиц равняется суммарной энергии (импульсу) конечных.

Отмечу особо, что сохраняется лишь энергия, число же частиц может меняться. Так, на современных ускорителях столкновение двух энергичных частиц, например электрона и позитрона, приводит к рождению сотен новых частиц,

Рис. 1.3. Столкновение электрона и позитрона с энергией, достаточной для рождения гораздо более массивных частиц, в данном случае протона, антипротона, мюона, антимюона и двух фотонов.



многие из которых гораздо массивнее электрона. Часть кинетической энергии сталкивающихся частиц переходит в массу рождающихся (см. рис. 1.3).

Квантовая электродинамика добилась выдающихся результатов. Например, магнитный момент мюона обычно выражается через некую величину $(g-2)/2$. Теоретические вычисления дают $(g-2)/2 = (11659176 \pm 6.7) \cdot 10^{-10}$, а экспериментальное значение $-(11659208 \pm 6) \cdot 10^{-10}$. Числа после знака \pm означают погрешность основной величины. Удивительная точность! Но не все в порядке и в этой области.

Посмотрим на процесс, представленный на рис. 1.4. Это уже знакомый нам эффект Комптона, но с небольшой добавкой: электрон, перед тем как улететь, излучает и поглощает фотон. Время существования последнего малое, поэтому такой фотон называется «виртуальным».

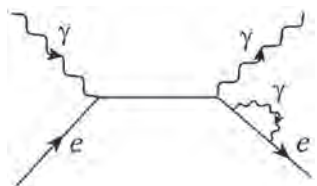


Рис. 1.4. Рассеяние фотона электроном с кратковременным рождением еще одного фотона.

Процесс происходит так быстро, что наблюдатель не в состоянии его заметить непосредственно, хотя теория, основанная на хорошо проверенных постулатах, предсказывает существование виртуальных частиц. Раз постулаты (законы) установлены, надо следовать им до конца. Так что законопослушный ученый должен научиться вычислять и подобные процессы.

Увы, оказалось, что последовательный расчет невозможен из-за возникающих бесконечно больших величин. Так, в расчете процесса рассеяния частиц, изображенного на рис. 1.4, возникает необходимость вычисления интегралов типа $\int_0^{\infty} dx/x$. Результат вычисления оказывается равным бесконечности! Теоретики давно научились обходить эту трудность, но она продолжает висеть дамокловым мечом, прямо указывая на то, что полноценная теория еще не создана.

Гравитационное взаимодействие

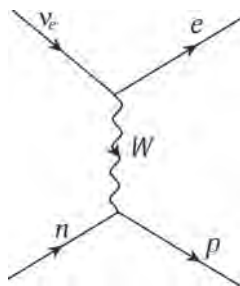
Самое слабое из всех. Чтобы представить себе его масштаб, можно, используя закон тяготения Ньютона и закон Кулона, вычислить силу электрического отталкивания двух электронов и силу их гравитационного притяжения. Оказывается, что отталкивание за счет электрических сил в 10^{43} раз больше! Но электромагнитные силы действуют на объекты, обладающие электрическим зарядом, а гравитационные – на любые объекты, обладающие энергией, включая, конечно, и энергию покоя, равную массе, $E = mc^2$ (напомню, что всюду в формулах $c = 1$). Макроскопические структуры обычно не заряжены, и для них гравитационное взаимодействие становится основным.

С помощью гравитационного поля описывают геометрию пространства, используя для этого уравнения, открытые в начале прошлого века Эйнштейном и Гильбертом. Уравнения крайне сложны, но для случая слабого поля, вдали от источников, эти уравнения указывают на существование гравитационных волн. В течение десятилетий все усилия по их поиску были тщетны. И вот 11 февраля 2016 года представители международного проекта Лазерно-интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории LIGO объявили о первой в истории регистрации гравитационных волн! Была зарегистрирована гравитационная волна от слияния двух черных дыр с массами около 30 масс Солнца. Событие произошло на расстоянии 1,3 миллиарда световых лет от Земли.

Слабое взаимодействие

Является самым слабым из всех, кроме гравитационного, что не умаляет его влияния на эволюцию Вселенной. Именно его слабость является ключевым моментом в ядерных процессах внутри звезд, позволяя им светить долго и равномерно. Об этом рассказывается в главе 3. Переносчиком слабого взаимодействия являются Z - и W -бозоны, массы которых на два порядка превосходят массу прото-

Рис.1.5. Электронное нейтрино (ν_e) и нейтрон (n) обмениваются W -бозоном и превращаются в электрон (e) и протон (p).



на. Пример диаграммы Фейнмана для процесса с участием слабого взаимодействия представлен на рис. 1.5.

Слабое взаимодействие эффективно только на сверхмалых расстояниях порядка 10^{-16} – 10^{-17} см. Кстати, совершенно не обязательно признаком слабого взаимодействия служит излучение или поглощение нейтрино. Обмениваться Z - и W -бозонами могут и электроны, и кварки. Но электроны могут обмениваться и фотонами (электромагнитное взаимодействие), а кварки – еще и глюонами (сильное взаимодействие). И лишь нейтрино сильно обделены Природой, которая дала им единственную возможность заявить о себе – через слабое взаимодействие. Поэтому вероятность столкновения нейтрино с другими частицами чрезвычайно мала. И это хорошо – ведь плотность реликтовых нейтрино, т.е. родившихся в ранний период эволюции Вселенной, задолго до появления звезд, равна 400 см^{-3} . Нетрудно подсчитать, что в данный момент через каждого из нас пролетает примерно 10^8 нейтрино со скоростью близкой к световой.

Сильное взаимодействие

Для стабильности ядер необходимо сильное притяжение, которое противодействовало бы кулоновскому отталкиванию протонов и удерживало протоны и нейтроны в ядре. Природа обеспечила нас таким взаимодействием, которое назвали по-простому – «сильное» (или ядерное). Все барионы, включая хорошо известные протон и нейтрон, состоят из «более элементарных» частиц – кварков, взаимодействие между которыми передается новыми безмассовыми частицами – глюонами. В отличие от других видов взаимодействия, сила притяжения между кварками возрастает с увеличением расстояния между ними. Поэтому никто

еще не обнаруживал отдельный кварк. Кварк может существовать только в коллективе с другими кварками. Протоны, нейтроны и π -мезоны как раз и являются примерами таких коллективов. Такая необычная ситуация получила название «конфайнмент» — пленение, заключение. Самое удивительное, что то же самое сильное взаимодействие между *коллективами* кварков *уменьшается* с расстоянием. Почему это происходит — до конца не ясно.

За все приходится платить: ядерные силы доминируют, но только на очень малых расстояниях — порядка 10^{-13} см. Например, мы знаем, что ядра железа стабильны, иначе среди окружающих нас предметов не было бы кастрюль и вилок. Но вот ядра урана уже нестабильны, хотя их размер всего вдвое превышает размер ядра железа. Сильные взаимодействия в ядрах урана уже не могут противодействовать электрическому отталкиванию протонов ядра.

Модель Вайнберга–Салама. Успехи и проблемы

Наилучшим достижением в физике элементарных частиц является модель Вайнберга–Салама, объединившая сначала слабые и электромагнитные взаимодействия, а затем и сильные. Чтобы проникнуться всей красотой этой теории, нужно разбираться в довольно сложной математике, изложение которой выходит далеко за рамки данной книги, но словесное обсуждение представляется необходимым. По значимости модель сравнима с открытием уравнений Максвелла, понявшего, что электрическое и магнитное поля не являются самостоятельными сущностями. Так, в световой волне происходит непрерывное преобразование электрического поля в магнитное и обратно. Именно поэтому световая волна называется электромагнитной.

Стивен Вайнберг и Абдус Салам показали, что слабое, электромагнитное и сильное взаимодействия имеют общее происхождение. Оказывается, что, например, электрон и нейтрино являются «двумя сторонами одной медали». Лишь при температурах, меньших 10^{15} К (или 100 ГэВ), они приобретают разные свойства, что мы и наблюдаем.

При больших температурах их свойства одинаковы, хотя различие между ними и кварками сохраняется вплоть до температур порядка 10^{15} – 10^{16} ГэВ.

Кроме того, в эту модель был включен любопытный механизм появления масс частиц. До этого никто не понимал, почему массы частиц именно таковы, они просто постулировались. Вайнберг и Салам для объяснения привлекли уже известный механизм (Хиггса), который объяснял происхождение масс частиц их взаимодействием с новым гипотетическим «полем Хиггса».

Успехи модели Вайнберга–Салама столь впечатляющи, что она получила название стандартной. Пожалуй, это последняя установившаяся модель в физике, предсказания которой были подтверждены экспериментально. Но и она не является завершённой, и некоторые облачка маячат на горизонте, предвещая будущую бурю. Кратко перечислим их.

Теоретическое значение величины $(g-2)/2$, о которой говорилось чуть выше, получено именно в рамках модели Вайнберга–Салама. Замечательное соответствие экспериментальной величине, но нетрудно видеть, что теория и эксперимент немного отличаются друг от друга. Отличие крайне мало, но кто знает, к чему это приведет в дальнейшем?



Рис. 1.6. Стивен Вайнберг

Эта модель предсказала существование новых частиц — W - и Z -бозонов, а также частиц Хиггса, ответственных за массы всех других частиц. W - и Z -бозоны нашли, и именно с теми параметрами, которые предсказывались! Это феноменальный успех модели. В июле 2012 года в ЦЕРНе состоялся специальный семинар, на котором было объявлено об открытии бозона Хиггса на Большом Адронном Коллайдере. Были надежно зарегистрированы продукты распада бо-

зона Хиггса на фотоны, а также на четыре лептона, и именно в такой пропорции, которую предсказывала Стандартная модель. Масса долгожданной частицы оказалась равной 125 ГэВ — на два порядка больше массы протона! Тем не менее, предстоит многолетняя работа по определению всех свойств этой частицы. Например, согласно Стандартной модели, бозоны Хиггса должны взаимодействовать друг с другом определенным образом, однако проверить это пока невозможно. Нужны значительно большие энергии и интенсивности сталкивающихся протонов.

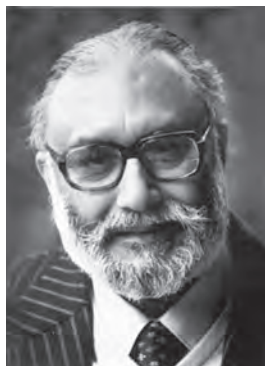


Рис. 1.7. Абдус Салам

Еще одна проблема. Частицы Хиггса взаимодействуют между собой слишком сильно — константа самодействия больше $1/4$. Значит, и квантовые поправки ко всем параметрам этой частицы велики, что не позволяет говорить достоверно о ее свойствах.

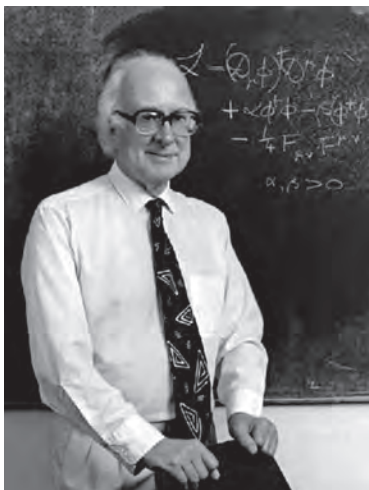


Рис. 1.8. Питер Хиггс

Кроме того, в модели имеются аномально малые, по сравнению с естественным планковским масштабом, параметры. Не ясно также происхождение разницы в массах электрона, мюона и τ -лептона. И еще один момент. В данной модели масса нейтрино равна нулю. Сейчас же стало известно, что эта масса хоть и мала, но отлична от нуля...

Похоже, облачка сгущаются в тучи, и необходима существенная коррекция модели.

Квантовая теория

Мы живем в большом мире, в котором все тела движутся по определенным траекториям. Но в конце прошлого тысячелетия был открыт микромир, где правит квантовая теория. В частности, стало понятно, что траектории частиц не являются гладкими, а представляют собой совокупность флуктуаций вокруг среднего движения. То же самое касается и энергии системы – она все время флуктуирует вокруг среднего значения, даже если система изолирована. Это красивая и сложная теория, но нам будет достаточно лишь одного ее следствия, которое называется

Принцип неопределенности Гейзенберга (соотношение неопределенностей). Он говорит о том, что мы принципиально не можем *точно* измерить пространственную координату частицы x и ее импульс p одновременно. Неопределенность этих величин чрезвычайно мала, поэтому о ней долго не подозревали, но она существует, так что выполняется неравенство

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2, \quad (1.1)$$

где \hbar – знаменитая постоянная Планка, одна из фундаментальных величин физики. Это неравенство утверждает, что если импульс частицы (а точнее, проекция импульса на ось x) измерен с точностью Δp , то ее координата не может быть измерена точнее величины $\Delta x = \hbar/2\Delta p$. Второе неравенство, которое нам понадобится в дальнейшем, записывается в виде

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar \quad (1.2)$$

и ограничивает величину флуктуации энергии ΔE в течение времени Δt . Формулы (1.1) и (1.2) относятся к *измерению* физических величин. А что же происходит с ними *на самом деле*? Квантовая теория предсказывает, что флуктуации физических величин действительно существуют, и для их оценки пользуются следующими формулами:

$$\Delta x \Delta p \sim \hbar \quad (1.3)$$

$$\Delta E \Delta t \sim \hbar \quad (1.4)$$

Эти равенства верны «по порядку величины», т. е. истинный результат может отличаться от оценки в несколько раз. Последняя формула означает, что энергия замкнутой системы может претерпевать флуктуации величиной ΔE , но на очень короткое время $\Delta t \sim \hbar/\Delta E$. Приведенные соотношения часто позволяют получать качественные, оценочные результаты, не прибегая к точным, но громоздким уравнениям квантовой теории.

Один такой пример изложен в Приложении 1, где показывается, что электрон не падает на ядро только потому, что в этом случае нарушилось бы фундаментальное соотношение (1.1). Мы видим, что электрон не поглощается ядром, поскольку подчиняется законам квантовой механики, но и не улетает от него благодаря электрическому притяжению. Таким образом, квантовые закономерности и поясняют стабильность атомов.

Чтобы увидеть, как работают формулы (1.3) и (1.4), оценим максимальное расстояние, на которое распространяется слабое взаимодействие. Пусть сталкиваются нейтрино и электрон. Из рис. 1.5 видно, что на какое-то короткое время должен родиться W -бозон. Если суммарная энергия нейтрино и электрона меньше его массы $m_W = 100$ ГэВ, то W -бозон может родиться только на короткое время. Из формулы (1.4) следует, что при флуктуации энергии на величину $\Delta E \approx m_W$ длительность этой флуктуации составляет

$$\Delta t \sim \hbar/\Delta E \approx \hbar/m_W.$$

Поскольку скорость W -бозона не может превышать скорость света, то наибольшая область его влияния имеет размер

$$l \sim \Delta t \approx \hbar/m_W \approx 10^{-16} \text{ см.}$$

Это совпадает с реальным расстоянием, на котором действует слабое взаимодействие. Мы видим, что соотношение неопределенностей Гейзенберга помогает понять сущность самых разных явлений. В дальнейшем оно будет использовано для оценки эффекта Хокинга — квантового испарения черных дыр.

Но вернемся к атомам, которые, оказывается, представляют собой сравнительно разреженную среду. Так, если ядро увеличить до размера одного метра, то электроны будут находиться на расстоянии 100 километров. Получается, что мы состоим в основном из пустоты. Электроны, даже находясь на таком расстоянии от своего ядра, образуют некое облако и не позволяют другим атомам проникать внутрь их «сферы влияния».

Почему же мы не ощущаем квантового поведения? Когда бегун пересекает финишную прямую, мы, казалось бы, можем точно измерить его скорость в этот момент. Увы, не все подвластно человеку. Скорость можно измерять очень точно, но эта точность все-таки ограничена снизу принципом неопределенности.

Поучительно оценить предел наших возможностей. Пусть масса бегуна $m = 100$ кг (он не претендует на чемпионское звание), и мы хотим определить его скорость в момент финиша. Пусть финишная ленточка имеет толщину $\Delta x = 1$ мкм — это 10^{-6} м — хорошая точность для любительских соревнований. Учитывая соотношение неопределенностей и то, что скорость связана с импульсом обычным образом, $v = p/m$, получим неточность в определении скорости:

$$\Delta v \sim \hbar/m\Delta x \approx 10^{-30} \text{ м/с.}$$

Неудивительно, что мы не замечаем таких мелочей. И это хорошо. Но если массу измеряемого объекта сильно уменьшить, скажем, до массы того же электрона, то неопределенность в скорости будет уже другой — $\Delta v \sim 100$ м/с! И так, еще раз: если мы хотим измерить положение электрона с точностью 10^{-6} м, то погрешность в определении его скорости не может быть меньше 100 метров в секунду! Это однозначное предсказание квантовой механики, справедливость которой подтверждена многократно.

Еще одно удивительное явление микромира — туннельный эффект. Оказывается, что частицы могут преодолеть энергетические барьеры, даже имея энергию, гораздо меньшую, чем сам барьер. Дело в том, что в микромире

действует соотношение (1.4), которое как раз и говорит о том, что на короткое время $\Delta t \sim \hbar/\Delta E$ энергия частицы может спонтанно увеличиться на величину ΔE . Если, имея такую дополнительную энергию, она перейдет через энергетический барьер за время, меньшее чем Δt , то уже за барьером частица отдаст «одолженную» энергию в окружающее пространство.

Таким образом, согласно квантовой теории, даже частицы малой энергии могут преодолевать высокие барьеры. Это явление обнаружено экспериментально. Оказывается, в микромире, согласно квантовой теории возможно то, что кажется невозможным в нашем макромире.

Почему же мы не замечаем этого кратковременного изменения энергии в повседневной жизни? Давайте мысленно встанем на весы. Поскольку мы делаем оценки по порядку величины, то пусть наша масса равна 100 кг (плюс-минус 30 кг значения не имеют). И пусть это будут очень точные весы, так что это будет зарегистрировано только если вес изменится более чем на 1/1000 грамма. На какое время такое изменение может произойти? Оценка по формуле (1.4) дает время изменения и возврата в прежнее положение порядка 10^{-45} секунды. Неудивительно, что мы не замечаем этих мелких и краткосрочных отклонений от закона сохранения энергии.

Поля

Мир частиц, конечно, интересен и сложен, но еще более интересен мир полей, успешно используемых для описания различных явлений. Более того, понятие поля стало ключевым в теоретической физике. При упоминании слова «частица» каждый невольно представляет себе маленький шарик, и это часто помогает понять происходящее явление (хотя иногда и мешает). К сожалению, при слове «поле» никаких полезных ассоциаций обычно не возникает, поскольку наш мозг не имел опыта взаимодействия с такими объектами.

Теперь некоторый опыт относительно свойств полей появился. Что такое волна, более или менее понятно — это колебания «чего-то» в каждой точке пространства. Это «что-то», имеющееся в каждой точке пространства, называется электромагнитным полем. Мы знаем закон воздействия этого поля на заряды и законы его распространения. Вот, собственно, и все! Заметьте, что я перечислял лишь различные свойства поля и не говорил, «что же это такое на самом деле». Тем не менее, при словах «электромагнитное поле» в общем неудовлетворенности не возникает. Это очень важный момент. Попробуйте объяснить кому-либо, скажем, инопланетянину, что такое, например, записная книжка, не показывая ее. Максимум, что вам удастся, это рассказать о ее свойствах и способах использования. Точно так же и в физике: мы говорим о свойствах объекта и о том, как он взаимодействует с другими объектами, — большего сделать нельзя. Попробуйте объяснить ребенку, что означает такое привычное свойство, как «масса тела», и вам опять придется описывать свойства и ничего более. Если нам что-то кажется «понятным», это означает, что мы просто привыкли этим пользоваться.

Кстати, а что же такое масса частицы в действительности? И вообще, как узнать, что перед нами частица, а не какой-либо другой объект, например, две частицы? Стандартный путь таков. Измеряются или вычисляются энергия и импульс системы. Затем вычисляется разность $m^2 = E^2 - p^2$. Если эта разность со временем не меняется, то мы говорим об объекте массы m . Элементарные частицы имеют фиксированные значения масс, которые приводятся во всех справочниках.

Понятие «поля» оказалось чрезвычайно плодотворным. На «полевом» языке частицы эквивалентны мелкой ряби на поверхности воды. Каждый сорт частиц соответствует колебаниям своего поля. В то же время, если использовать это понятие, то оказывается возможным описывать и другие, не менее интересные явления — большие волны типа цунами, «водовороты», «водопады» и т. д.

Представление частиц как волн соответствующего поля помогает ответить на некоторые принципиальные вопросы. Действительно, если, например, мюон распадается на электрон, нейтрино и антинейтрино, то почему мюон считается элементарной частицей? Казалось бы, он должен состоять из этих трех, «более элементарных», частиц. На самом деле переносить наш повседневный макроскопический опыт в микромир нужно с большой осторожностью. Процесс распада мюона более правильно трактовать следующим образом: «колебания мюонного поля возбудили колебания электронного и нейтринных полей. При этом колебания мюонного поля затухли».

Итак, возвращаемся к понятию «поле» в теоретической физике. На протяжении всей книги будет достаточно понимать, что это некая функция от пространственных переменных, которая может меняться со временем. В качестве конструктивного элемента необходимо задать взаимодействие этого поля с другими полями, форму его энергии, а также его динамическое уравнение, такое, например, как уравнения Максвелла для электромагнитного поля.

Отступление Поля и потенциалы

Выберем обозначение для поля. Например, такое: $\phi(x,t)$. Это означает, что в каждой точке пространства, отмеченного координатой x , задано число, зависящее от времени. Если это поле как-то связано с реальностью, то оно должно иметь энергию E . Последняя должна зависеть от этого самого поля $\phi(x,t)$. Точнее, если в очень маленькой области пространства объемом dV мы знаем, чему равно поле, то мы должны указать, как вычисляется его энергия в этой области. Очевидно, что чем меньше объем dV , тем меньше должна быть энергия dE , заключенная в нем, т.е. $dE = U dV$ (т.е. dE пропорционально dV). Если коэффициент пропорциональности $U(\phi(x,t))$ не зависит от производных поля $\phi(x,t)$ по времени и координатам, то он называется плотностью потенциальной энергии, или, кратко, потенциалом.

Выбор конкретной функции $U(\phi)$ полностью в руках исследователя. Наиболее часто встречающиеся варианты показаны на рисунках.

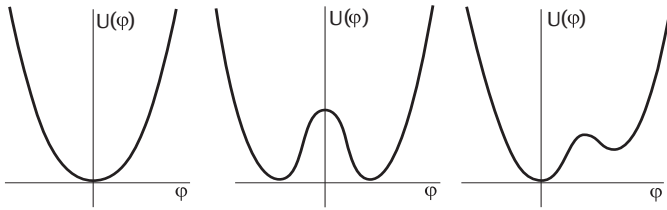


Рис. 1.9. Различные формы потенциалов, используемых в физике. Форма первого – простейшая модель. Второй используется для моделей с нарушением симметрии (в конечном итоге поле окажется в минимуме потенциала, симметрия будет нарушена). Форма третьего допускает туннелирование из верхнего минимума в нижний.

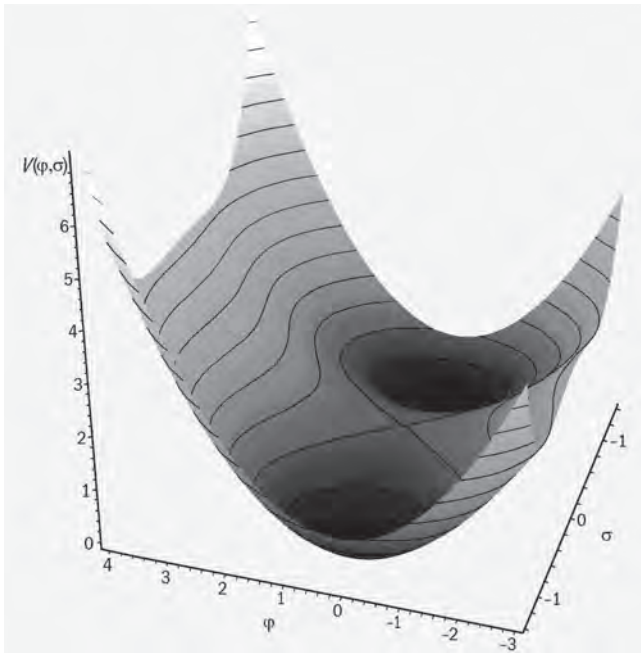


Рис. 1.10. Один из возможных потенциалов, используемых в космологии. Плотность энергии в определенной точке пространства (потенциал) зависит в данном случае от полей φ и σ . Зависимость от нескольких гипотетических полей предоставляет дополнительные возможности для объяснения происхождения такой вселенной, как наша.

Здесь можно возразить: «Как это так — что хотят, то и постулируют (подразумевая форму потенциала)? Откуда мы знаем, что это правильно?». На данном этапе возражать, конечно, трудно. Но ведь это только начало длинного пути. Задав форму потенциала, ученый должен объяснить множество явлений, проверить, не противоречат ли его выводы экспериментальным данным. И только после этого, в случае успеха, он скажет: «Я не знаю, почему потенциал таков, но я сделал правильный выбор».

Вспомните законы Ньютона. Ведь и про них можно было задать тот же вопрос: «Почему, собственно, они такие, как написано в учебниках?». А ответ все тот же: Ньютон догадался правильно, поскольку предсказания, сделанные на основе этих законов, совпадают с наблюдениями.

Отступление Скалярное поле

Очень часто в научной литературе можно встретить упоминание о *скалярном* поле, т.е. поле, для описания которого каждой точке пространства поставлено в соответствие некоторое число (скаляр), которое может зависеть и от времени — $\varphi(x,t)$. Простейшим примером скалярного поля является температура поверхности тела, которая может меняться от точки к точке и зависеть от времени.

Как было сказано выше, каждое поле должно характеризоваться своим набором параметров, чтобы частицы, соответствующие этому полю, имели наблюдаемые характеристики типа массы, спина, заряда. Скалярные поля предназначены для описания частиц, характеризующихся всего одним параметром — массой. У таких, скалярных, частиц отсутствует, например, спин. Существуют ли они?

Ответ на этот вопрос не так прост. Действительно, таковыми являются, например, хорошо известные π^0 -мезоны. С другой стороны, когда в современной космологии упоминаются скалярные частицы, имеются в виду, конечно, не π^0 -мезоны, а другие, гипотетические скалярные частицы. Почему чаще всего выбираются именно скалярные поля?

Во-первых, их существование предсказывается современными теориями (которые, впрочем, могут оказаться и неверными).

Во-вторых, необходимой составляющей стандартной модели Вайнберга–Салама является скалярное поле Хиггса (названное в честь физика Хиггса, предложившего нетривиальную форму потенциала для этого поля, см. рис. 1.9, средний график).

В-третьих, не менее успешная модель Большого взрыва также основывается на предположении о существовании особого скалярного поля под названием «инфлатон».

И, в-четвертых, современные теории настолько сложны, что скалярные поля используются как простейшие, на которых тестируется новая теория. Если результаты оказываются обнадеживающими, то можно вводить более сложные поля.

Макрообъекты

Окружающая нас природа есть результат эволюции Вселенной. На начальной стадии основная энергия заключалась в первичном поле. Затем это поле распалось, породив частицы материи, а его энергия перешла в энергию самих частиц. Дальнейшее уменьшение температуры привело к объединению частиц во все более сложные агломераты. Сейчас мы живем в мире ярких красок благодаря близости к Солнцу, а в ночное время можем наблюдать невооруженным глазом на небе около 3000 звезд. В телескопы можно видеть миллионы галактик, их движение и слияния, взрывы сверхновых звезд, рождение молодых звезд. Галактики содержат миллиарды звезд, при этом для наблюдений доступно порядка 10^{11} галактик, которые и образуют видимую Вселенную.

Все это обилие явлений изучает физика, и в частности, космология. Как же ученым, занимающимся астрофизикой и космологией, удастся проверять свои идеи? Ведь звезды находятся далеко. Конечно, с развитием техники сами приборы стали намного точнее и разнообразнее. Но что этими приборами измерять? И как полученные результаты интерпретировать? Чтобы это понять, нам придется сделать небольшой экскурс в теорию и вкратце познакомиться с основными законами космологии.

Отступление Закон Вина

Нагретое тело испускает электромагнитное излучение с различными длинами волн, которые, пройдя сквозь призму, попадают на экран и отображаются в виде цветных линий. По яркости линии можно судить о числе излученных фотонов. Расстояния между линиями пропорциональны разнице длин волн.



Рис. 1.6. Спектр, включающий в себя линии атома водорода (486 нм и 656 нм).

Конечно, форма спектра, по которому можно судить о вкладе определенной длины волны, зависит от температуры и свойств тела. Физики уже давно ввели понятие абсолютно черного тела – системы, которая *поглощает* всё падающее на нее излучение. Обратите внимание: *излучать*-то оно может, и, значит, абсолютно черное тело можно видеть. Солнце – прекрасный пример.

Спектр излучения абсолютно черного тела зависит уже только от его температуры. Для нас будет важной наиболее вероятная длина волны электромагнитного излучения тела. Обозначим ее λ_{\max} . Тогда связь с температурой выглядит особенно просто:

$$\lambda_{\max} = b/T, \quad b = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ м}\cdot\text{К} \quad (1.5)$$

Формула (1.5) известна как закон Вина.

Интересно подсчитать, с какой, в основном, длиной волны приходит к нам свет от Солнца. Учитывая, что поверхность Солнца нагрета до температуры 5700 К, простой расчет по формуле (1.5) дает длину волны $0,5 \cdot 10^{-6}$ метра. Это как раз та длина волны, которую лучше всего различают наши глаза. Мы ее чувствуем как «зеленую». Так живая природа подстраивается под внешние условия.

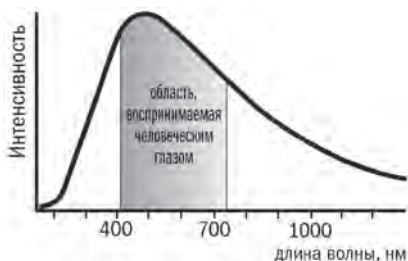


Рис. 1.7. Зависимость интенсивности излучения поверхности Солнца от длины волн.

Наши глаза устроены так, что разные длины волн мы воспринимаем как разный цвет. Чем длиннее волна, тем более «красным» нам кажется предмет. Так, девушка, одетая в красное, отличается от старичка, одетого в синее, в частности, тем, что она испускает электромагнитные волны большей длины. Есть, конечно, и другие отличия.

При более внимательном сравнении рисунков 1.6 и 1.7 видна некоторая странность. Действительно, судя по рис. 1.7, нагретые объекты, в данном случае Солнце, испускают излучение во всем спектре длин волн, с той или иной степенью интенсивности. В то же время, согласно рис. 1.6, спектр нагретого тела представлен дискретным набором длин волн. Создается впечатление, что существует, по крайней мере, два механизма излучения фотонов. Эта гипотеза оказывается верной, хотя оба механизма основаны на одном физическом явлении – излучении фотонов заряженными частицами при изменении их состояния. Солнце нагрето до высокой температуры, так что заряженные частицы – в основном протоны и электроны – имеют большую кинетическую энергию, часть которой излучается в виде фотонов при столкновениях. Ускорения при столкновениях хаотичны, и энергия излучаемых фотонов может принимать любые разумные значения, о чем и свидетельствует рис. 1.7.

С другой стороны, горячее тело, состоящее из атомов, также излучает фотоны, но механизм отличается от только что рассмотренного. В нагретом теле атомы также движутся и сталкиваются хаотично, что приводит к их возбуждению – переходам электронов, принадлежащих атомам, на более высокие уровни. Через некоторое время электроны возвращаются на прежний уровень с меньшей энергией, излучая фотоны. Энергия такого фотона равна разнице энергий уровней. Поскольку энергия уровней атомов дискретна, то и излучаются фотоны лишь с некоторыми энергиями. Если говорить на языке физики волн, в спектре излучения присутствует дискретный набор длин волн, что и видно на рис. 1.6.