

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 миллионнолетним 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 учитывать 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 , мюонное 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 взаимно уничтожаются (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 Хигса, которое ответственно за массы частиц. Значит и силы электромагнитного и слабого взаимодействий становятся примерно одинаковыми.

Некоторое представление о механизме Хигса 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-

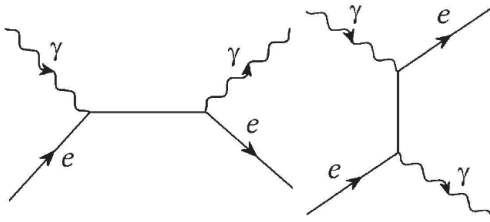


Рис. 1.2. Рассеяние фотона (обычно обозначается буквой γ) на электро-не (e).

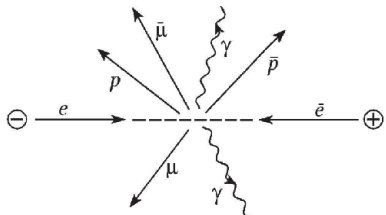
мя поглощает фотон, а затем излучает его, но уже с другим импульсом. Казалось бы, такая картина противоречит законам сохранения энергии и импульса, запрещающим поглощение фотона свободной частицей. Важное отличие состоит в том, что фотон поглощается после рождения через очень короткое время. Квантовая 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».

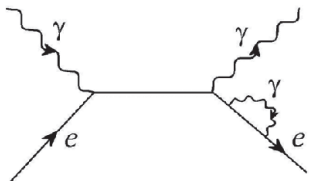


Рис. 1.4. Рассеяние фотона электроном с кратковременным рождением еще одного фотона.

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-

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru