

практику уравнения Клейна — Гордона. Интерпретация бозонных состояний с отрицательной энергией оказалась совершенно отличной от теории Дирака и использовала идеи метода вторичного квантования (Паули и Вайскопф [6]). Однако эта интерпретация совершенно эквивалентна нашему правилу, по которому для античастиц всего лишь меняется роль «входящих» и «выходящих» состояний.

(Лекции, с 6-й по 14-ю, представляют собой содержание неопубликованного обзора по странным частицам, написанного Р. Фейнманом и М. Гелл-Манном.)

6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ И ФЕРМИЕВСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Теперь приступим к описанию того, до какой степени нам удается продвинуться в решении основной задачи, задачи вековой давности: объяснить весь наблюдаемый мир через небольшое количество элементов, сочетающихся в бесконечно разнообразных комбинациях. Самый первый вопрос: каковы эти элементы? Многочисленные неожиданные результаты экспериментов в области высоких энергий выявили недостаточность наших представлений об этих элементах. Мы опишем ниже те теоретические идеи, которые оказались наиболее плодотворными при «наведении порядка» в экспериментальном материале. При этом мы уделим основное внимание самим идеям и не будем подробно обсуждать их происхождение или историю развития. Более того, мы сможем описать лишь современный взгляд на вещи. Почти каждое утверждение можно было бы начинать оговоркой типа: «Разумеется, на этот вопрос можно взглянуть с другой стороны, но...». Мы вполне отдаляем себе отчет о фрагментарности и неполноте наших современных представлений и множестве мыслимых возможностей, однако наше изложение весьма усложнилось бы при постоянных упоминаниях о них. Наш текст содержит обзор достижений многих исследователей, а вовсе не отчет о новых результатах авторов.

Все наблюдаемое множество форм и разнообразие поведения материи, по всей видимости, может быть описано с помощью конечного числа фундаментальных частиц,

взаимодействующих определенным образом. Они подчиняются общим принципам квантовой механики и принципу относительности. Согласно этим принципам, составляющим основу квантовой теории поля, не существует ничего, кроме этих частиц. Частицы обладают рядом внутренних свойств, таких как масса покоя и спин, а связи между ними выражаются через взаимодействия.

Электромагнитное взаимодействие. Свет, например, представлен фотоном—частицей с массой покоя 0 и спином 1. Испускание света возбужденным атомом представляется как результат фундаментального взаимодействия или процесса

$$e \rightarrow e, \gamma \quad (e — \text{электрон}, \gamma — \text{фотон}),$$

означающего, что существует возможность (которая более точно описывается соответствующей величиной—амплитудой) того, что электрон может «стать» фотоном и электроном. Точная математическая форма этого взаимодействия (зависимость амплитуды от направления движения и спина участвующих частиц) известна с большой точностью (во всяком случае, до энергий, меньших 1 ГэВ). Когда этот акт происходит с электроном в атоме, атом испускает свет. Каждому процессу соответствует обратный (каждая медаль имеет две стороны), описываемый соответствующей амплитудой. В нашем случае обратный процесс — это процесс поглощения света:

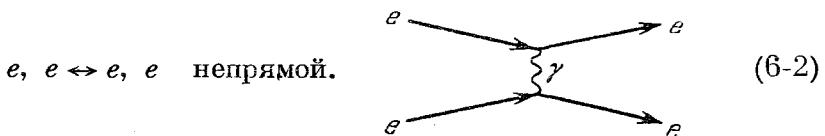


Подобные соотношения описываются либо двойной стрелкой, либо картинкой, на которой линии соответствуют входящим или выходящим частицам. Картина изображена справа от формулы (6-1).

Единичный свободный электрон не может испустить один фотон из-за сохранения энергии и импульса, но когда два электрона оказываются рядом, то один из них может испустить фотон, который незамедлительно поглощается другим электроном. Квантовая механика допускает «временное» существование состояний, реальное осуществление которых запрещено законами сохранения. Прохождение через потенциальный барьер при распаде радиоактив-

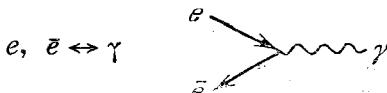
ных элементов представляет собой хорошо известный пример такого рода. Результат такого обмена фотоном выступает как взаимодействие между электронами, т. е. как сила электрического отталкивания, обратно пропорциональная квадрату расстояния. Таким образом, все электрические и магнитные силы, действующие между электронами, так же как испускание, рассеяние и поглощение радиоволн, света и рентгеновских лучей электронами, достаточно точно описываются во всех деталях простым законом (6-1). Соответствующий раздел квантовой теории поля называется спинорной электродинамикой.

Процесс, который может возникнуть лишь в силу временного нарушения законов сохранения, называется виртуальным процессом. Диаграмма, изображающая электроны, взаимодействующие посредством обмена виртуальным фотоном, будет



Только реальные частицы изображаются линиями со свободными концами (два входящих электрона и два выходящих), тогда как оба конца линии виртуального фотона «упираются» в фундаментальные взаимодействия (6-1).

Важную роль играет еще один принцип, связанный с обратимостью во времени: каждой частице соответствует античастица. (Для некоторых нейтральных частиц, например для фотона, античастица совпадает с частицей.) Соотношения для процессов с участием античастиц получаются по простому правилу: переставьте частицу в противоположную часть уравнения, заменив ее при этом на античастицу. Антиэлектрон есть не что иное, как позитрон, поэтому (6-1) дает



и процессы рождения и аннигиляции пар, таким образом также полностью описываются уравнением (6-1). Переставляя фотон в другую часть уравнения (6-1): $e, \bar{\gamma} \leftrightarrow e$, мы снова получаем уравнение (6-1), так как фотон не имеет анти-

частицы, или, более точно, античастица для фотона есть снова фотон ($\bar{\gamma} = \gamma$).

Многие другие фундаментальные частицы также связаны с фотоном; так, если символом p обозначить протон, то можно записать

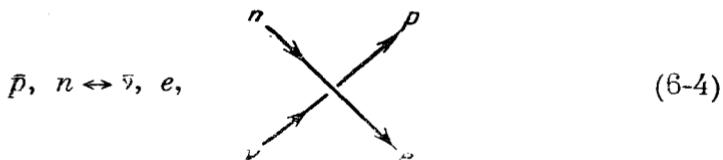


Все подобные частицы называются «заряженными». Электрический заряд e фигурирует в двух замечательных законах, ни один из которых не получил хорошего объяснения. Первый сводится к тому, что все фундаментальные частицы имеют один и тот же заряд (который может отличаться знаком) *). Второй закон гласит, что все другие взаимодействия таковы, что полный заряд всех частиц в любом процессе никогда не меняется. Наконец, численное значение электрического заряда представляется безразмерным отношением

$$\frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137,039}.$$

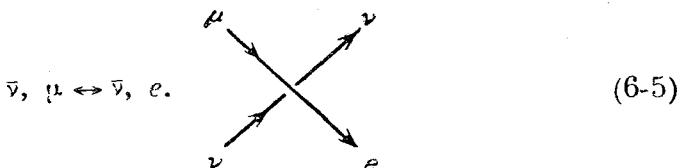
Значение и происхождение этой величины, которая является выражением силы взаимодействия (6-1), также остается загадочным. Численное значение определено экспериментально. Как раз в силу малости числа $1/137$ мы и считаем электромагнитное взаимодействие довольно слабым.

Взаимодействие Ферми. Есть, однако, еще одно взаимодействие, даже более слабое, чем электромагнитное. Это — взаимодействие Ферми, ответственное, в частности, за β -распад нейтрона. Именно распад нейтрона n на протон, электрон и антинейтрино $n \rightarrow p, e, \bar{\nu}$ рассматривается как прямой результат взаимодействия

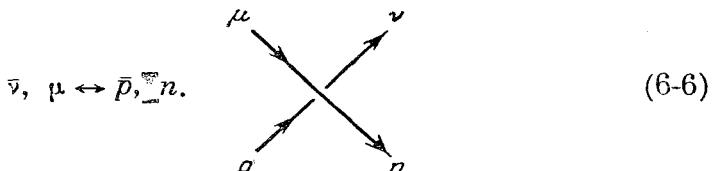


*) В настоящее время известен ряд резонансов, несущих заряд, кратный заряду электрона, например, Δ (1232, $3/2^-$ ($3/2^+$)).
(Прим. перев.)

которое мы будем называть взаимодействием Ферми. Его также часто называют слабым взаимодействием. Другой пример фермиевского взаимодействия является распад мюона μ — заряженной частицы, подобной электрону, которая, однако, тяжелее его в $208,8 \pm 1$ раз, $\mu \rightarrow e + \nu + \bar{\nu}$



Наконец, третья форма фермиевского взаимодействия ответственна за захват мюона ядром $\mu + p \rightarrow n + \nu$



Другие формы описывают медленные распады странных частиц, и мы коснемся их позднее.

7. ФЕРМИЕВСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И НИСПРОВЕРЖЕНИЕ ЧЕТНОСТИ

Замечательным образом интенсивности взаимодействий Ферми для каждого из трех приведенных примеров оказываются равными. Они определяются постоянной G , удовлетворяющей соотношению

$$\frac{GM^2}{\hbar c} = (1,01 \pm 0,01) 10^{-5},$$

где M — масса протона, введенная для того, чтобы получить безразмерное отношение. Это отношение очень мало — взаимодействие очень слабое. Единственное взаимодействие, известное для нейтрино (масса покоя 0, спин $1/2$), — это фермиевское взаимодействие. Таким образом, взаимодействие нейтрино с материей очень слабо, и его прямая регистрация чрезвычайно затруднена.