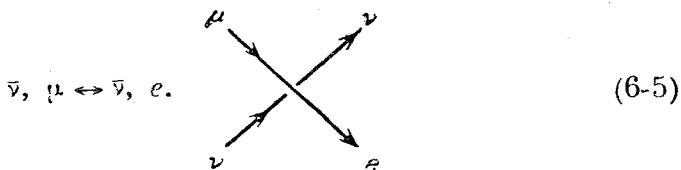
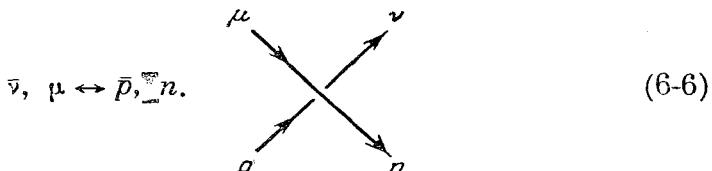


которое мы будем называть взаимодействием Ферми. Его также часто называют слабым взаимодействием. Другой пример фермиевского взаимодействия является распад мюона  $\mu$  — заряженной частицы, подобной электрону, которая, однако, тяжелее его в  $208,8 \pm 1$  раз,  $\mu \rightarrow e + \nu + \bar{\nu}$



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.

Детальная форма взаимодействия Ферми была установлена в 1957 году. Оно является единственным взаимодействием, нарушающим принцип симметрии физических законов относительно отражения (известного также как закон сохранения четности).

В течение долгого времени казалось очевидным, что для каждого физического процесса существует (или может в принципе существовать) зеркально-сопряженный процесс. Вследствие этого различие между правым и левымказалось относительным, ни то ни другое не могло быть определено абсолютным образом. Разумеется, мы должны отвлечься от некоторых исторических примеров (например, вращения нашей планеты), поскольку они соответствуют частному выбору начальных условий. Если бы мы передали по радио обитателю другой галактики инструкцию по конструированию какого-либо устройства, то он вполне бы мог построить вместо него зеркальное отображение такого устройства, так как мы не смогли бы сообщить наше определение понятий левого и правого. Все опыты, основанные на использовании электромагнитных и ядерных сил, полностью соответствовали такой точке зрения.

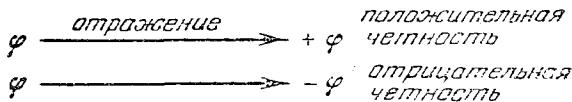
Эта идея в квантовой механике нашла свое отражение в свойстве четности состояния. Положим, что прибор рождает объект в состоянии  $\varphi$ , тогда как зеркально-отраженный прибор создает объект в состоянии  $\varphi'$ . Принцип суперпозиции требует теперь

$$\varphi' = P\varphi,$$

где  $P$  — линейный оператор. Но

$$P\varphi' = \varphi$$

с точностью до фазового множителя. Поэтому  $P^2=1$  и существуют только две возможности:



Принцип симметрии отражения требует, чтобы система всегда оставалась в состоянии с данной четностью.

Однако в начале 1957 года по предложению Янга и Ли была проведена серия экспериментов, результаты кото-

рых пришли в противоречие с этим принципом. Рассмотрим опыт с  $\text{Co}^{60}$ , изображенный на рис. 7-1. Спины ядер  $\text{Co}^{60}$  были упорядочены магнитным полем при очень низких температурах вдоль одного направления, и наблюдалось угловое распределение испущенных электронов. Оказалось, что электроны в основном вылетают назад по отношению к направлению спина  $\text{Co}^{60}$ . В (воображаемом) зеркальном эксперименте электроны должны испускаться преимущественно по направлению спина  $\text{Co}^{60}$ . Поэтому

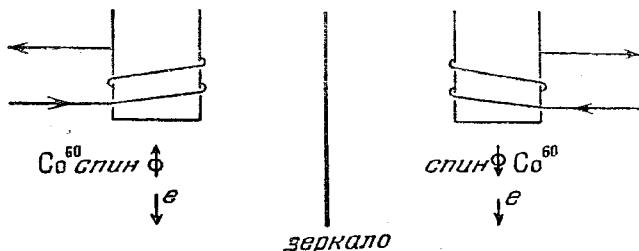


Рис. 7-1.

такой процесс не может иметь место в мире, симметричном относительно отражения.

Мы приходим к выводу, что в радиограмме нашему человеку в другой галактике мы можем дать определение левого и правого. Для этого он должен упорядочить спины ядер  $\text{Co}^{60}$  и определить направление магнитного поля, при котором электроны вылетают преимущественно назад. Но что если наш коллега состоит из антиматерии, использует анти- $\text{Co}^{60}$  и наблюдает позитроны? В настоящее время мы полагаем, что он получит правило левой руки. Иными словами, мы считаем, что зеркальный мир есть возможный мир, при условии, что материя заменена на антиматерию. Поэтому позитроны от анти- $\text{Co}^{60}$  будут испускаться параллельно магнитному полю.

**Гравитация.** В дополнение к этим взаимодействиям есть еще одно, еще более слабое, — гравитация. Законы гравитации, прекрасно известные в классическом макроскопическом пределе, до сих пор не были вполне удовлетворительно «переведены» на язык квантовой теории поля. Если это будет сделано, то появится частица (гравитон: масса покоя 0, спин 2), универсально связанная со всеми другими частицами такой малой константой связи, что

гравитационные силы между электронами оказываются в  $10^{-39}$  раз слабее электрических.

**Ядерные силы.** Однако, помимо этих довольно слабых взаимодействий: гравитационного, фермиевского и электромагнитного, должно существовать еще что-то гораздо более сильное. Силы, связывающие нуклоны в ядре, слишком велики, чтобы их можно было бы объяснить с помощью перечисленных трех взаимодействий. Как раз эти сильные взаимодействия и частицы, в которых они участвуют, мы и хотим сейчас обсудить. В сильных взаимодействиях не участвуют ни электроны, мюоны и нейтрино (называемые вместе лептонами, или слабо взаимодействующими частицами), ни фотоны и гравитоны. Частицы, подверженные сильным взаимодействиям, называются «сильно взаимодействующими частицами» и состоят из гиперонов (в число которых входят протон и нейtron) и мезонов. (Мюон не считается мезоном.)

Силы, удерживающие электроны около ядер, разумеется, являются силами кулоновского притяжения, возникающими в результате обмена виртуальным фотоном между электроном и протоном ядра [т. е. комбинации взаимодействий (6-1) и (6-3)]. Но само ядро состоит из нейтронов и протонов, связанных сильным притяжением.

Эти ядерные силы очень тщательно изучались путем исследования ядер и реакций рассеяния нейтронов и протонов на протонах. Они оказались не только значительно более интенсивными, чем электрические силы, но также и гораздо более сложными. В действительности, за исключением одной неожиданной мелочи, они оказались почти настолько сложными, насколько это возможно. Вместо сил, обратно пропорциональных квадрату радиуса, это — силы очень большого отталкивания на малых расстояниях и притяжения на несколько больших расстояниях, быстро спадающие к нулю на расстояниях, больших  $10^{-13}$  см. Силы зависят от относительного направления спинов  $p$  и  $n$  и от ориентации этих спинов по отношению к линии, связывающей две частицы. Они даже зависят от скорости частиц и ее направления относительно спина (спин-орбитальное взаимодействие). Но — один неожиданный пустячок. Силы между  $p$  и  $p$ , между  $p$  и  $n$  и между  $n$  и  $n$  практически равны друг другу. Разумеется, между  $p$  и  $p$  имеются электрические силы, которым нет аналога в системе  $p$  и  $n$ ,

но если их учесть, положив, что полное взаимодействие есть сумма ядерного плюс электрическое, то, насколько известно, ядерные части  $p,p$ -сил,  $p,n$ -сил и  $n,n$ -сил равны, если частицы находятся в одинаковых состояниях.

**Изотопический спин.** Таким образом, структура сильных ядерных взаимодействий имеет определенную симметрию (именуемую симметрией изотопического спина), отражающую симметрию сил относительно замены протона на нейтрон. Даже малая разница масс покоя нейтрона и протона весьма вероятно представляет массу, связанную с электромагнитным полем, окружающим эти частицы.

Выучим наш первый урок. Он сводится к тому, что сильно взаимодействующие частицы образуют группы или наборы. Нуклоны — это набор из двух состояний — протона и нейтрона. Оба состояния имеют одну и ту же энергию. Они аналогичны двум спиновым состояниям электрона (спин «вверх» и спин «вниз» вдоль данной оси), которые имеют одинаковую энергию в отсутствие магнитного поля.

Благодаря тому, что квантовая механика системы с двумя состояниями была в деталях изучена на примере системы со спином  $\frac{1}{2}$ , физики-теоретики использовали эту аналогию в полной мере. Два состояния нуклона представляются как состояния «вверх» и «вниз» объекта со спином  $\frac{1}{2}$ , в некотором воображаемом трехмерном пространстве. Оно называется пространством изотопического спина. Мы говорим, что нуклон имеет изотопический спин  $\frac{1}{2}$ . Равенству сил соответствует гипотеза о том, что любое направление может быть выбрано за направление изотопического спина. В обычном конфигурационном пространстве такая изотропия приводит к сохранению момента. Поэтому сильные взаимодействия обладают соответствующим свойством — законом сохранения полного изотопического спина.

Так как частицы со спином  $0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, \dots$  могут находиться в  $1, 2, 3, 4, \dots$  состояниях соответственно, то набору, скажем, трех состояний соответствует изотопический спин  $1$  и т. д. Поэтому мы можем использовать известные приемы комбинирования состояний с различными моментами для того, чтобы определить, как различные частицы могут взаимодействовать друг с другом симметрично отно-

сительно замены протона на нейтрон или, более общо, с сохранением симметрии изотопического спина.

Все это справедливо только в сильных взаимодействиях; изотопический спин не сохраняется в слабых взаимодействиях, как и в электродинамике. Протон и нейтрон, разумеется, совершенно различным образом связаны с фотоном.

**Пион-нуклонная связь.** Для иллюстрации этих идей предположим, как предложил Юкава, что ядерные силы являются результатом процесса типа (6-2), в котором вместо электрона стоит нуклон, а вместо фотона — какая-то другая частица. Попробуем реализовать такую возможность. Допустим, что фундаментальный процесс, аналогичный (6-1), имеет вид

$$p \leftrightarrow n, \pi^+, \quad p \rightarrow \begin{cases} n \\ \pi^+ \end{cases} \quad (7-1)$$

где  $\pi^+$  обозначает положительный пион, новую частицу, которая в силу закона сохранения электрического заряда должна быть положительно заряжена. Как следствие, должны возникнуть силы между протоном и нейтроном,

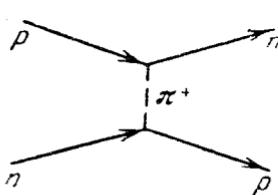


Рис. 7-2.

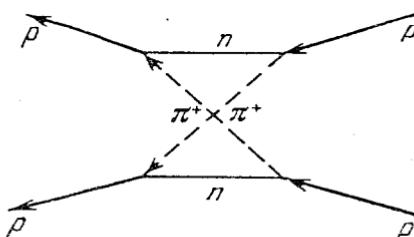


Рис. 7-3.

обусловленные обменом виртуальным  $\pi^+$  (см. рис. 7-2). (В данном случае  $p$  и  $n$  поменялись местами, поэтому это обменные силы.)

Взаимодействие (7-1) приводит к тому, что между двумя протонами возникает сила, отвечающая обмену двумя положительными пионами (рис. 7-3). Но силы двухпионного обмена не могут быть равны силам однопионного обмена. Поэтому должен существовать способ

однопионного обмена для двух протонов. Должен существовать нейтральный пион  $\pi^0$  и процесс

$$p \leftrightarrow p, \pi^0, \quad p \rightarrow p + \pi^0 \quad (7-2)$$

а также для нейтрона

$$n \leftrightarrow n, \pi^0, \quad n \rightarrow n + \pi^0 \quad (7-3)$$

Эти новые взаимодействия меняют силы между  $n$  и  $p$ , добавляя необходимую часть (рис. 7-4). В результате ряда

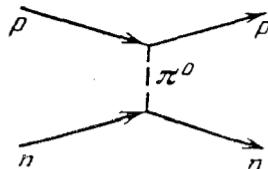


Рис. 7-4.

попыток было установлено, что если (7-1) имеет место, то (7-2), (7-3) и

$$n \leftrightarrow p, \pi^- \quad n \rightarrow p + \pi^- \quad (7-4)$$

также необходимы, но амплитуды или интенсивности (аналог. электрического заряда для пионного взаимодействия) для (7-1) и (7-4) должен быть в  $\sqrt{2}$  больше, чем для (7-2), а амплитуды для (7-3) и (7-2) равны и противоположны по знаку. При этих условиях можно показать, что симметрия ядерных сил  $(p, p) = (p, n) = (n, n)$  сохраняется при всех условиях независимо от того, какое число пионов участвует в обмене.

## 8. ПИОН-НУКЛОННАЯ СВЯЗЬ

Пусть существуют три фундаментальных взаимодействия, изображенные на рис. 8-1, где  $a$ ,  $b$  и  $c$  — амплитуды процессов (1), (2) и (3). Определим константы связи