

§ 2. ИЗОСПИН И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Хотя протон и нейтрон являются единственными стабильными или существующими в стабильных ядрах сильно-взаимодействующими частицами, в столкновениях элементарных частиц при высоких энергиях рождается множество новых сильно-взаимодействующих частиц. Они быстро распадаются (за время $\sim 10^{-8}$ с и менее). Сильно-взаимодействующие частицы называются адронами, и к ним, в частности, относятся π -мезоны, Λ - и Σ -частицы. Подробно мы остановимся на них в гл. 11, сейчас же заметим только, что π -мезон бывает трех типов: π^+ , π^0 и π^- с зарядами 1, 0 и -1 в единицах e . Точно так же Σ -частицы имеют заряды ± 1 и 0, тогда как Λ -частица не заряжена. Массы трех зарядовых состояний π -мезона приблизительно одинаковы. То же относится и к Σ -частицам. Эта ситуация очень напоминает ту, которая наблюдается в случае с протоном и нейтроном, и дает основания полагать, что π -мезоны и Σ -частицы имеют изоспин $T=1$, а Λ -частицы — изоспин $T=0$. Оказывается, что вообще все адроны объединяются в изоспиновые мультиплеты и, следовательно, им может быть приписан изоспин T . Таким образом, изоспин является еще одной внутренней характеристикой частиц, такой, как масса, спин, заряд и четность. Заметим, однако, что в то время как у нуклона связь заряда с третьей проекцией изоспина дается выражением $Q = e(1/2 + T_z)$, для π -мезонов, Λ - и Σ -частиц соответствующая формула имеет вид $Q = eT_z$. Две эти формулы будут объединены в одну в гл. 11 в рамках более широкой SU_3 -симметрии.

Инвариантность сильных взаимодействий по отношению к изоспиновым преобразованиям и правильность значений изоспина, приписанного нами различным частицам, могут быть проверены при рассмотрении ядерных столкновений, в которых участвуют нуклоны, π -мезоны, Λ - и Σ -частицы. Приписывая определенный изоспин различным частицам, мы полагаем, что имеется некое абстрактное преобразование, действующее на изоспиновые переменные всех частиц. Это соответствует тому, что, хотя разные частицы имеют разный спин, вращение системы координат действует на спиновые переменные всех частиц одновременно. Таким образом, изоспины складываются

по правилам векторного сложения, и, как мы увидим, эксперименты согласуются с инвариантностью сильного взаимодействия по отношению к таким одновременным изоспиновым преобразованиям.

A. Взаимодействие π -мезонов с нуклонами.

Так как изоспин π -мезона T равен 1, а для нуклона $T = \frac{1}{2}$, изоспин системы, состоящей из π -мезона и нуклона, согласно правилу сложения угловых моментов, может принимать значения $T = \frac{3}{2}$ или $T = \frac{1}{2}$. Пользуясь соотношениями (7.40) для повышающих и поникающих операторов, можно показать, что состояния системы с определенными значениями T и M_T , которые мы обозначаем через $|TM_T\rangle$, даются формулами:

$$\begin{aligned} \left| \frac{3}{2} \frac{3}{2} \right\rangle &= |\pi^+ p\rangle, \\ \left| \frac{3}{2} \frac{1}{2} \right\rangle &= \sqrt{\frac{1}{3}} |\pi^+ n\rangle + \sqrt{\frac{2}{3}} |\pi^0 p\rangle, \\ \left| \frac{3}{2} - \frac{1}{2} \right\rangle &= \sqrt{\frac{2}{3}} |\pi^0 n\rangle + \sqrt{\frac{1}{3}} |\pi^- p\rangle, \\ \left| \frac{3}{2} - \frac{3}{2} \right\rangle &= |\pi^- n\rangle, \\ \left| \frac{1}{2} \frac{1}{2} \right\rangle &= \sqrt{\frac{2}{3}} |\pi^+ n\rangle - \sqrt{\frac{1}{3}} |\pi^0 p\rangle, \\ \left| \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \right\rangle &= \sqrt{\frac{1}{3}} |\pi^0 n\rangle - \sqrt{\frac{2}{3}} |\pi^- p\rangle. \end{aligned} \quad (10.5)$$

Эти равенства можно обратить. Например,

$$|\pi^- p\rangle = \sqrt{\frac{1}{3}} \left| \frac{3}{2} - \frac{1}{2} \right\rangle - \sqrt{\frac{2}{3}} \left| \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \right\rangle. \quad (10.6)$$

Тогда предположение об изоспиновой инвариантности сильного взаимодействия приведет к многочисленным соотношениям между сечениями рассеяния π -мезонов на нуклонах. Например, два процесса упругого рассеяния $\pi^+ + p \rightarrow \pi^+ + p$ и $\pi^- + n \rightarrow \pi^- + n$ должны иметь одинаковые сечения, так как они соответствуют состояниям с $T = \frac{3}{2}$ и различаются только значениями M_T . В то же время из равенства (10.6) следует, что в процессе $\pi^- + p \rightarrow \pi^- + p$ участвуют состояния как с $T = \frac{3}{2}$, так и с $T = \frac{1}{2}$. Изоспин-

новая симметрия ничего не говорит о соотношении между сечениями рассеяния состояний с $T = \frac{3}{2}$ и $T = \frac{1}{2}$. Следовательно, если не предполагать наличие какой-либо дополнительной симметрии, нет оснований считать сечения $\pi^- p$ - и $\pi^+ p$ -рассеяния одинаковыми. Эксперимент согласуется со следствиями, выведенными из изоспиновой симметрии, и не указывает на наличие дополнительной симметрии. Другими словами, рассеяние в состояниях с $T = \frac{3}{2}$ и $T = \frac{1}{2}$ происходит по-разному. Действительно, при низких энергиях доминирует рассеяние в состояниях с $T = \frac{3}{2}$, и из формул (10.6) и (10.5) следует, что отношение амплитуд $\pi^+ p$ - и $\pi^- p$ -рассеяния равно 3 : 1, т. е. отношение соответствующих сечений равно 9 : 1. Эксперимент подтверждает этот результат [2].

§ 3. ИЗОСПИНОВАЯ СИММЕТРИЯ И ЗАРЯДОВАЯ НЕЗАВИСИМОСТЬ

Когда в § 1 мы вводили понятие изоспина в ядрах, мы видели, что изоспиновая инвариантность гамильтонiana сильного взаимодействия эквивалентна его зарядовой независимости. Далее понятие изоспиновой инвариантности было распространено на другие частицы, и эксперимент показывает, что с точностью до электромагнитных поправок изоспиновая инвариантность имеет место в сильных взаимодействиях всех адронов. Однако такая расширенная изоспиновая инвариантность уже *не эквивалентна* зарядовой независимости. Точная зарядовая независимость привела бы к тому, что в примере из § 2 сечения $\pi^+ p$ - и $\pi^- p$ -рассеяния были бы одинаковыми, а это противоречит экспериментальным данным.

Точно так же при взаимодействии двух π -мезонов имеет место изоспиновая инвариантность, однако *нет* зарядовой независимости. Два π -мезона с $T = 1$ каждый, находящиеся в s -состоянии по относительному угловому моменту, могут иметь суммарный изоспин $T = 2$ или $T = 0$, так как π -мезоны являются бозонами (гл. 5, § 9). Эксперименты по $\pi\pi$ -рассеянию подтверждают наличие изоспиновой симметрии, но показывают в то же время, что взаимодействия в состояниях с $T = 2$ и $T = 0$ различны. Таким образом, и в этом случае нет зарядовой инвариантности.