

асимптотически при очень высоких энергиях сечения неупругих процессов, идущих с перезарядкой, пренебрежимо малы по сравнению с сечениями обычного упругого рассеяния, то в этой энергетической области в (139,3) останется лишь первый член. Тогда, в предположении строгой унитарной симметрии, получим асимптотическое равенство амплитуд упругого рассеяния π -, η -, K - и \bar{K} -мезонов на барионах:

$$f_{\pi}^{\infty} = f_{\eta}^{\infty} = f_K^{\infty} = f_{\bar{K}}^{\infty}. \quad (140,12)$$

В случае нарушенной симметрии нужно использовать формулу (140,11), откуда следует соотношение между амплитудами, аналогичное массовому:

$$f_{\pi}^{\infty} + 3f_{\eta}^{\infty} = 2(f_K^{\infty} + f_{\bar{K}}^{\infty}). \quad (140,13)$$

В заключение этого параграфа заметим, что примерно таким же способом можно исследовать изоспиновую симметрию, нарушенную электромагнитным взаимодействием с плотностью гамильтониана (135,10). Предоставляем читателю в качестве полезного упражнения самостоятельно получить, например, следующие формулы для изомультиплета Σ и изоквартета Δ :

$$m_{\Sigma^0} = \frac{1}{2}(m_{\Sigma^+} + m_{\Sigma^-}) \quad (140,14)$$

и

$$m_{\Delta^{++}} - m_{\Delta^-} = 3(m_{\Delta^+} - m_{\Delta^0}). \quad (140,15)$$

§ 141. Составные модели в схеме унитарной симметрии. Кварки

В начале § 134 упоминалось, что π -мезон (вообще говоря, и все прочие нестранные адроны) можно мыслить как частицу, состоящую из нуклона и антинуклона. Естественно попытаться сформулировать аналогичную «минимальную» модель, в которой все адроны конструируются из небольшого числа каких-то частиц, объявляемых в известном смысле фундаментальными. Для этого к нуклону, носителю барионного числа и изоспина (а значит, и электрического заряда), необходимо добавить еще по крайней мере одну частицу, которая обладала бы странностью. Наиболее экономную модель такого типа предложил в 1956 г. Саката, который в качестве фундаментальных частиц выбрал p , n , Λ и \bar{p} , \bar{n} , $\bar{\Lambda}$ и предположил, что между любым фундаментальным барионом и антибарионом существует притяжение, а между двумя барионами или антибарионами — отталкивание. Волновые функции известных в то время адронов

строились следующим образом:

$$\begin{aligned} \pi^+ &= p\bar{n}, \quad \pi^- = \bar{p}n, \quad \pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(p\bar{p} - n\bar{n}), \\ K^+ &= p\bar{\Lambda}, \quad K^0 = n\bar{\Lambda}, \quad K^- = \bar{p}\Lambda, \quad \bar{K}^0 = \bar{n}\Lambda; \\ \Sigma^+ &= p\bar{n}\Lambda = \pi^+\Lambda, \\ \Sigma^- &= \bar{p}n\Lambda = \pi^-\Lambda, \quad \Sigma^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(p\bar{p} - n\bar{n})\Lambda = \pi^0\Lambda; \\ \Xi^- &= \bar{p}\Lambda\Lambda = K^-\Lambda, \quad \Xi^0 = \bar{n}\Lambda\Lambda = \bar{K}^0\Lambda. \end{aligned} \quad (141,1)$$

Эта модель развивалась Марковым, Окунем и другими учеными, и с ее помощью удалось получить большое количество интересных физических результатов.

Оказалось, что модель Сакаты очень хорошо укладывается в схему унитарной симметрии, если пренебречь различием в массах нуклона и Λ -гиперона. Для этого достаточно считать, что эти частицы образуют триплет (1,0), а соответствующие античастицы — сопряженный триплет (0,1):

$$S_i = \begin{pmatrix} p \\ n \\ \Lambda \end{pmatrix}; \quad \bar{S}^i = (\bar{p}, \bar{n}, \bar{\Lambda}). \quad (141,2)$$

Оператор проекции изоспина (138,1) для p , n и Λ дает правильные значения $+1/2$, $-1/2$ и 0 , но оператор гиперзаряда (138,2) нужно модифицировать так, чтобы вместо дробных значений он приводил к $Y = +1, +1, 0$ соответственно. Положим, по определению,

$$\hat{Y} = \frac{1}{\sqrt{3}} \Lambda_8 + \frac{2}{3} B\hat{I}, \quad (141,3)$$

так что вместо (138,6) теперь будем иметь

$$Y = \frac{p-q}{3} - p_3 + q_3 + \frac{2}{3} B. \quad (141,4)$$

Из требования целочисленности гиперзаряда, учитывая, что для мезонов $B = 0$, приходим к старому соотношению $p - q = 3n$, т. е. эти частицы и в модели Сакаты должны заполнять унитарные синглеты, октуплеты и т. д. Для барионов же $B = 1$ и вместо (138,7) получим

$$p - q = 3n - 2, \quad (141,5)$$

т. е. барионы должны заполнять унитарные триплеты (1,0) = 3, секступлеты (0,2) = $\bar{6}$, 15-плеты (2,1) = 15 и т. д. Пользуясь

формулами (138,5) и (141,4), сразу находим значения изоспина и гиперзаряда для компонент этих мультиплетов:

Компоненты	Y	T	Компоненты	Y	T
φ_a	1	1/2	φ_{ab}^3	2	1
φ_3	0	0	φ_{3a}^3	1	1/2
φ^{33}	2	0	$\varphi_{ab}^c + \frac{1}{3} [\delta_a^c \varphi_{3b}^3 + \delta_b^c \varphi_{3a}^3]$	1	3/2
φ^{3a}	1	1/2	φ_{33}^3	0	0
φ^{ab}	0	1	$\varphi_{3a}^b + \frac{1}{2} \delta_a^b \varphi_{33}^3$	0	1
($a, b = 1, 2$)			φ_{33}^a	-1	1/2

Заполнение адронов по указанным мультиплетам соответствует их волновым функциям (141,1). Действительно, мезоны строятся из «сакатона» S_i и антисакатона \bar{S}^i , и их волновые функции преобразуются по прямому произведению $3 \otimes \bar{3}$, которое в своем разложении (137,4а) содержит как раз представления 1 и 8. Барионы строятся из двух сакатонов и одного антисакатона, а разложение (137,4в) прямого произведения $3 \otimes 3 \otimes \bar{3}$ включает именно нужные представления 3, $\bar{6}$ и 15.

Из таблицы видно, что Σ -гиперон следует поместить по крайней мере в секступлет, который включает нуклоноподобную частицу и частицу с $Y = +2$, $T = 0$, которые должны иметь спин $1/2^+$. Эти частицы до сих пор не обнаружены, хотя запретов на их существование не имеется. Ξ -гиперон должен входить в 15-плет, в котором остается большое количество незанятых мест, а Ω -гиперон вообще нельзя включить ни в один из низших мультиплетов. Таким образом, классификация адронов, основанная на модели Сакаты, гораздо менее удовлетворительна, чем в восьмеричном формализме. Кроме того, она привела к ряду выводов, прямо противоречащих эксперименту: например, в модели Сакаты запрещен наблюдавшийся процесс $\bar{p} + p \rightarrow K_L^0 + K_S^0$.

Желая сохранить все преимущества составных моделей, с одной стороны, и восьмеричного формализма, с другой, Гелл-Манн, и независимо Цвейг, в 1964 г. предложили отказаться от модификации оператора гиперзаряда (138,2) и в то же время считать, что имеется унитарный триплет

$$q_i = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix}, \quad \bar{q}^i = (\bar{q}_1, \bar{q}_2, \bar{q}_3) \quad (141,6)$$

частиц, обладающих весьма непривычными свойствами. Из (138,4)—(138,6) и (138,9) следует, что они имеют такие квантовые числа (барионное число равно $1/3$ по определению):

Частица	Q	T	T_3	S	B	Y
q_1	$+2/3$	$1/2$	$+1/2$	0	$1/3$	$+1/3$
q_2	$-1/3$	$1/2$	$-1/2$	0	$1/3$	$+1/3$
q_3	$-1/3$	0	0	-1	$1/3$	$-2/3$

(квантовые числа античастиц, все, кроме T , имеют противоположный знак), т. е. электрический заряд, барионное число и гиперзаряд этих частиц являются дробными. Этими свойствами они и обязаны своему названию — *кварки* (нечто непонятное и мистическое из одного из романов английского писателя Д. Джойса).

Мезоны строятся из одного кварка и одного антикварка и вследствие (137,4а) размещаются по унитарным синглетам и октуплетам. Если пара $q - \bar{q}$ находится в 1S_0 -состоянии, то ее полный спин равен нулю, а четность отрицательна, и мы получаем псевдоскалярные мезоны с волновыми функциями

$$\begin{aligned} \pi^+ &= q_1 \bar{q}_2, & \pi^- &= \bar{q}_1 q_2, & \pi^0 &= \frac{1}{\sqrt{2}} (q_1 \bar{q}_1 - q_2 \bar{q}_2); \\ K^+ &= q_1 \bar{q}_3, & K^0 &= q_2 \bar{q}_3, & K^- &= \bar{q}_1 q_3, & \bar{K}^0 &= \bar{q}_2 q_3; \\ \eta &= \frac{1}{\sqrt{6}} (q_1 \bar{q}_1 + q_2 \bar{q}_2 - 2q_3 \bar{q}_3); & X^0 &= \frac{1}{\sqrt{3}} (q_1 \bar{q}_1 + q_2 \bar{q}_2 + q_3 \bar{q}_3), \end{aligned} \quad (141,7)$$

где X^0 — резонанс в системе $\pi\eta$ с массой 960 Мэв и с $T = Y = 0$, являющийся унитарным синглетом. Если пара $q - \bar{q}$ находится в 3S_1 -состоянии, то ее спин равен 1^- , и мы приходим к векторным мезонам ρ , K^* , ω' и ϕ' , волновые функции которых строятся аналогично (141,7). Так как для кварка $B = 1/3$, то система из трех таких частиц будет иметь барионное число, равное 1, и поэтому ее естественно отождествить с барионом (напомним, что в модели Сакаты барионы строятся из двух частиц и одной античастицы). Волновая функция системы $q - q - q$ преобразуется по представлению $3 \otimes 3 \otimes 3$ и поэтому из разложения (137,4б) следует, что в модели кварков, как и в восьмеричном формализме, барионы заполняют унитарные синглеты, октуплеты и декуплеты. Если спины двух кварков параллельны, то существует девять состояний $1/2^+$, из которых одно является унитарным синглетом, а восемь остальных принадлежат унитарному октуплету. Если спины всех трех кварков

параллельны, то получаем 10 состояний $3/2^+$, образующих декуплет.

Мы не будем рассматривать динамические следствия модели кварков и некоторые присущие ей трудности, отсылая читателя к соответствующей литературе¹⁾. Остановимся коротко лишь на проблеме реальности существования этих необычных частиц. Если кварки действительно существуют, то их мир должен быть почти не зависимым от обычного: из дробности заряда вытекает, что самый легкий из кварков должен быть абсолютно стабильным, причем рождаться они могут только в виде пары кварк—антикварк, например, в результате бомбардировки обычной материи космическими лучами. Поэтому с течением времени общее количество кварков, содержащихся в земной коре и в водах океана должно постепенно увеличиваться. Однако многочисленные попытки найти эти «реликтовые» кварки с помощью прецизионной аппаратуры пока успехом не увенчались. Не удалось открыть их и в экспериментах на ускорителях—установлена лишь нижняя граница для их массы: $m_q > 5 \text{ Гэв}$ ($5 \cdot 10^3 \text{ Мэв}$). Это говорит о том, что если адроны действительно построены из кварков, то их энергия связи должна быть колоссальной. В такой ситуации все большее число физиков (в том числе и сам Гелл-Манн) начинает склоняться к мысли, что если кварки и существуют, то они не могут находиться в свободном состоянии, а подобны квазичастицам, например, фононам, в твердом теле. Некоторые крупные ученые (Гейзенберг, Чью и др.) относятся к гипотезе кварков резко отрицательно.

Но, несмотря ни на что, модель кварков является весьма привлекательной и даже в самом худшем случае она является очень удобным математическим инструментом для формулировки унитарной симметрии. Ближайшее будущее должно дать ответ на один из кардинальных вопросов современной физики элементарных частиц: реальные ли кварки, и если да, то в каком смысле, или они являются чисто математической фикцией?

§ 142. Общая оценка унитарной симметрии

Из содержания предшествующих параграфов видно, что в последние годы физика элементарных частиц благодаря гипотезе о приближенной инвариантности сильного взаимодействия относительно группы $SU(3)$ весьма значительно продвинулась

¹⁾ См., например, обзор Е. М. Левина и Л. Л. Франкфурта в УФН 94, 243 (1968) и достаточно популярный обзор Я. Б. Зельдовича в УФН 86, 203 (1965).