

вычислить отношение скоростей для процессов (8-4) и (8-5). В результате мы ожидаем обнаружить один случай $e\nu$ -распада на 7400 случаев $\bar{e}\bar{\nu}$ -распада. Это предсказание недавно было подтверждено экспериментально (с точностью около $\pm 15\%$).

9. СТРАННЫЕ ЧАСТИЦЫ

Существует еще ряд частиц, сильно связанных с пионами и нуклонами. В начале 50-х годов некоторые такие частицы были открыты в космических лучах. Так, например, была обнаружена нейтральная частица (в современных обозначениях Λ -гиперон), которая распадалась на p и π^- :

$$\Lambda \rightarrow p + \pi^-. \quad (9-1)$$

Согласно современным данным ее масса = 2182 m_e , а время жизни = $(2,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-10}$ сек. Это очень большая величина по сравнению с характерным временем сильных взаимодействий (10^{-23} сек — время, за которое свет проходит расстояние между соседними нуклонами в ядре). Поэтому распад (9-1) представляет собой слабый процесс, вероятно, связанный с β -распадом. В рамках сильной связи нет фундаментального взаимодействия вида

$$\Lambda \leftrightarrow p, \pi^-.$$

(Если бы он существовал, то распад (9-1) происходил бы очень быстро.)

Но каким же образом рождаются Λ -частицы? Космические лучи состоят из быстрых протонов, которые в атмосфере сталкиваются с ядрами, состоящими из протонов и нейтронов, а также виртуальных пионах, возникающих благодаря сильному взаимодействию (6-4). На опыте Λ -частицы рождаются так часто, что процесс должен идти через сильную связь. Она не может иметь вид $p + \pi^- \rightarrow \Lambda$, потому что, как мы видели, это не сильное взаимодействие. Не может быть также что-то вроде $p + n \rightarrow \Lambda + p$, так как отсюда вытекала бы возможность сильного распада $\Lambda \rightarrow p + n + \bar{p}$, и поскольку $\bar{p} + n \rightarrow \pi^-$ —

сильный процесс в соответствии с (7-4), то распад (9-1) также был бы сильным. Невозможна также реакция



поскольку, хотя (9-1) — это слабый процесс, он все же существует и тогда существовала бы возможность для трех нейтронов в ядре превращаться в один посредством виртуального перехода



При этом выделялась бы большая энергия, равная массе покоя двух нейтронов, и ни одно из ядер, кроме водорода, не было бы стабильным. Обычное вещество вроде куска угля является поразительно стабильным: весьма тонкие опыты по обнаружению распада не принесли успеха, и мы теперь знаем, что так называемые стабильные ядра имеют время жизни не менее 10^{17} лет.

Это рассуждение приводит нас к новому принципу, который должно использовать при выборе взаимодействий. Не может существовать никакой комбинации сильных или слабых взаимодействий, приводящих к исчезновению или распаду нуклонов на более легкие частицы. Поэтому, поскольку один нуклон рождается при распаде Λ , в точности один нуклон должен быть израсходован при рождении Λ .

Простейший способ проследить за этим — приписать каждой частице некоторое число нуклонов, «спрятанных» в ней, или более точно — полное число нуклонов, содержащихся в конечных продуктах распада (антинуклоны входят со знаком минус). Это число все еще не имеет общепринятого названия; для него был предложен термин — нуклонный заряд. Таким образом, нуклонный заряд Λ равен +1, так же как для p и n . Электроны и пионы обладают нуклонным зарядом 0, антипротоны и антинейтроны — зарядом минус 1. Не было обнаружено фундаментальных частиц с нуклонным зарядом, большим 1.

Итак, мы пришли к принципу: все взаимодействия должны удовлетворять правилу — *нуклонный заряд всегда сохраняется*.

Совместное рождение. К-мезоны. Из аргументов подобного типа становится ясным, что в сильных процессах одновременно должно рождаться несколько странных

частиц (например, $n + n \rightarrow \Lambda + \Lambda$). И в самом деле, в космических лучах были обнаружены другие новые частицы, в частности, нейтральная частица, известная сейчас как K^0 -мезон, или нейтральный каон, распадающийся на два пиона

$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- \quad (9-3)$$

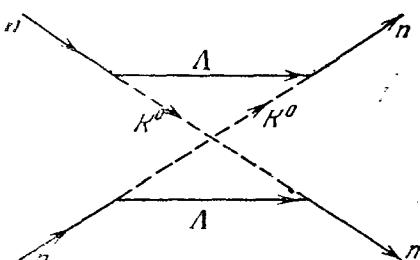


Рис. 9-1.

с временем жизни порядка 10^{-10} сек. Она имеет массу 966 и, очевидно, нуклонный заряд 0. Здесь мы снова имеем медленный распад, приводящий к той же самой трудности, связанной с механизмом образования, что и в предыдущем случае.

Пайс и Гелл-Манн предположили, что эти две частицы рождаются совместно и что истинная реакция рождения является результатом сильного взаимодействия

$$n \leftrightarrow \Lambda, K^0. \quad n \xrightarrow{\text{---}} \Lambda \quad K^0 \quad (9-4)$$

Эта гипотеза была затем подтверждена на опыте. Однако сильное взаимодействие для нейтрона, подобное (9-4), должно влиять на ядерные силы (рис. 9-1). Баланс сил между n , n и p , p требует существования аналогичного взаимодействия для протона. Поскольку не было обнаружено какой-либо заряженной частицы, подобной (т. е. примерно с той же массой) Λ , то нам остается предположить существование взаимодействия

$$p \leftrightarrow \Lambda, K^+. \quad (9-5)$$

Такой заряженный аналог K^0 -мезона действительно был обнаружен в космических лучах; масса $K^+ = 967$. Если записать реакцию (9-5) на изотопическом языке соотношений типа (8-1), (8-2), то нуклон в левой части имеет изоспин $1/2$. Из сохранения изотопического спина теперь следует, что полный изоспин правой части также равен $1/2$. Поскольку Λ есть синглет, изотопический спин которого

равен 0, то K должен иметь изоспин $1/2$ и представлять собой дублет с двумя возможными состояниями.

Хотя его сильное взаимодействие (9-5) подобно взаимодействию (9-4) для K^0 и распад

$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0,$$

аналогичный (9-3), имеет место, время жизни K^+ -мезона $\approx 1,2 \cdot 10^{-8}$ сек — много больше, чем у K^0 -мезона, что напоминает нам об отсутствии изотопической симметрии у слабых взаимодействий.

В космических лучах были также открыты и другие частицы, рождающиеся в подозрительном изобилии. Весь этот экспериментальный материал удалось привести в порядок с помощью нового принципа, вследствие которого в сильных взаимодействиях такие частицы всегда входят парами.

Странность. Допустим, что частица K^0 обладает некоторым новым видом заряда, отсутствующим у нуклонов и пионов, и предположим, что этот заряд не может рождаться и исчезать (т. е. сохраняться) в сильных взаимодействиях. Тогда отдельный K -мезон не может быть рожден в сильном взаимодействии, но если допустить, что Λ несет отрицательную единицу этого заряда, то образование Λ совместно с K допустимо. Этот заряд был назван «странностью». Мезоны K^0 и K^+ имеют странность 1, Λ — странность минус 1, нуклоны и мезоны — странность 0. Полная странность в сильных взаимодействиях должна сохраняться. Странность может меняться только в слабых взаимодействиях [как это следует из существования распада (9-3)].

Следуя этой идее, Гелл-Манн и Нишиджима, независимо друг от друга, предложили схему для упорядочивания наших знаний о странных частицах и предсказания различных соотношений между ними. С помощью этой схемы, напоминающей периодическую таблицу химических элементов, мы опишем сильно взаимодействующие частицы, известные в настоящее время.

Барионы. Рассмотрим сперва частицы с нуклонным зарядом 1. Вся группа таких частиц получила название барионов. Они приведены в таблице 9-1. Данной схемой было предсказано существование частицы Σ^0 . Было также предсказано, что эта частица будет распадаться

с очень коротким временем жизни на Λ и γ -квант. Эта частица и ее (Λ , γ)-распад действительно были обнаружены. Дублет ($T=1/2$) частиц Ξ^- , Ξ^0 со странностью -2 имеет массу около 2584. Частица Ξ^- , или каскадная

Таблица 9-1

Изоспин T	Заряд			Странность
	—	0	+	
$1/2$	Ξ^-	Ξ^0		-2
1	Σ^-	Σ^0	Σ^+	-1
0		Δ		
$1/2$		n	p	0

В порядке возрастания масс:

Дублет ($T=1/2$) нуклонов n , p	с массой ≈ 1836	0
Синглэт ($T=0$) — нейтральный Δ	с массой ≈ 2182	-1
Триплет ($T=1$) Σ^- , Σ^0 , Σ^+	с массой ≈ 2330	-1
Дублет ($T=1/2$) Ξ^- , Ξ^0	с массой ≈ 2584	-2

частица, уже была известна из опытов с космическими лучами (и была также недавно получена в лаборатории в опытах на ускорителе). Она распадается довольно медленно ($\sim 10^{-10}$ сек) на Λ и π^- . Это свойство получает естественное объяснение, только если ее странность равна -2 . Было также наблюдено, что одновременно с Ξ^- рождаются два K . То, что частица Ξ^- должна быть дублетом, вытекает из связи между странностью и изотопическим спином, предложенной Гелл-Манном и Ниджимой: *Странность S равна удвоенному среднему электрическому заряду q каждого мультиплета минус его нуклонный заряд N .* Для барионов $N=1$, и поэтому $S=2q-1$. Поскольку для Ξ странность $S=-2$, то средний электрический заряд равен $-1/2$ и Ξ должен составлять дублет. Предсказанная этим путем частица Ξ^0 недавно была найдена.

Антибарионы. Каждому из этих гиперонов должна соответствовать античастица с нуклонным зарядом $=-1$. Поэтому перечень антибарионов имеет в точности тот же вид и состоит из частиц той же самой массы, но с противоположными по знаку значениями электрического заряда

и странности. Из этих частиц антинейтрон \bar{n} , антипротон \bar{p} и, совсем недавно, антилямбда $\bar{\Lambda}$ были искусственно получены в лабораторных условиях.

Мезоны. Далее идут сильно взаимодействующие частицы с нуклонным зарядом 0 (общее название — мезоны).

Таблица 9-2

Изоспин T	Заряд			Странность
	-	0	+	
$1/2$	K^-	K^0		-1
$1/2$		K^0	K^+	+1
1	π^-	π^0	π^+	0

В порядке возрастания масс:

Триплет ($T = 1$) пионов π^- , π^0 , π^+ с массой ≈ 276 0

Дублет ($T = 1/2$) каопов K^0 , K^+ с массой ≈ 965 +1

и их античастицы \bar{K}^0 , \bar{K}^- -1

Они приведены в таблице 9-2. Заряженные пионы π^+ и π^- являются взаимными античастицами, а π^0 совпадает со своей античастицей. Но, поскольку каоны K^+ и K^0 обладают странностью +1, их античастицы должны иметь странность -1 и, в частности, должны существовать два нейтральных каона со странностями +1 и -1 соответственно.

Мы перечислили все частицы, существование которых общепризнано в настоящее время. Имеется, однако,

Таблица 9-3

Продукты реакции	Число наблюдаемых событий
$\Sigma^+ N \pi^-$	44
$\Sigma^- N \pi^+$	55
$\Sigma^- p \pi^0$	7
$\Lambda^0 p \pi^-$	
$\Sigma^0 p \pi^-$	48 (всего)
$\Lambda^0 N \pi^0$	
$\Sigma^0 N \pi^0$	72 (всего)

небольшое число событий, наблюдаемых в космических лучах, интерпретация которых остается загадочной и которые могут сигнализировать о существовании других частиц. Существование почти всех антибарионов было установлено на опыте.

Задача 9-1. Было произведено наблюдение K -захватов на дейтерии: $K+D \rightarrow$ гиперон + пион + нуклон. Получены данные, приведенные в таблице 9-3. Нет способа отличать Λ^0 -частицы от Σ^0 .

Можете ли вы проверить принцип сохранения изотопического спина?

Сделайте любые предсказания, какие можете, в частности, для выходов Λ^0 и Σ^0 по отдельности.

10. НЕКОТОРЫЕ СЛЕДСТВИЯ СТРАННОСТИ

Концепция странности, сохраняющейся в сильных взаимодействиях, привела к большому количеству предсказаний, ни одно из которых не было опровергнуто опытным путем. Она оказалась также вполне безотказным подспорьем при упорядочивании экспериментального материала. Так, например, было предсказано, что при образовании Λ или Σ в ядерных соударениях должны возникать также K^0 или K^+ . Реакции вида $n+n \rightarrow \Lambda+\Lambda$ невозможны, поскольку полная странность двух $\Lambda = -2$, а у нейтронов она равна 0.

С другой стороны, K^- -мезон, налетающий на ядро, может родить Λ , а K^+ не может.

Распад нейтрального каона. Одно из наиболее блестящих предсказаний теории со странностью было сделано Пайсом и Гелл-Манном. Оно связано с тем обстоятельством, что должны существовать две нейтральные K -частицы с противоположной странностью: K^0 и ее античастица \bar{K}^0 . Как оказалось, K^0 может распадаться на два пиона. В частности, был найден распад



с временем жизни $\sim 10^{-10}$ сек. В этом распаде, разумеется, нарушается странность, как это и происходит в слабых взаимодействиях. С той же вероятностью анти-