

при $a > 0$ имеют симметричное решение $\mathbf{r} = 0$ и несимметричные решения

$$\mathbf{r}(\mathbf{n}) = \mathbf{na}/2b, \quad (7.23)$$

где \mathbf{n} — любой единичный вектор. При этом симметричное решение соответствует локальному максимуму $U(\mathbf{r})$, т. е. неустойчивому положению покоящейся в этой точке частицы. В точках же (7.23) энергия $U(\mathbf{r})$ минимальна. Покоящаяся в такой точке частица находится в устойчивом состоянии по радиальному движению и в состоянии безразличного равновесия по движению по сфере.

Таким образом, в низшем энергетическом состоянии $\mathbf{p} = 0$, $\mathbf{r}(\mathbf{n}) = \mathbf{na}/2b$ имеет место спонтанное нарушение симметрии. При уменьшении параметра a до значений $a < 0$ решение (7.23) исчезает, а решение $\mathbf{r} = 0$ становится минимумом. Спонтанное нарушение симметрии снимается.

В физике элементарных частиц состоянием со спонтанно нарушенной симметрией считается вакуум. В современной теории вакуум — не пустота, а состояние квантовой материи с наименьшей плотностью энергии. В упомянутых в § 1, п. 7 объединенной теории слабых и электромагнитных взаимодействий и в единой кварк-глюонной теории сильных взаимодействий спонтанное нарушение вакуума является одним из краеугольных камней. В этих теориях исходные уравнения для этой квантовой материи обладают существенно более высокой симметрией, чем вакуумное решение. Спонтанное нарушение симметрии вакуума является довольно сильным и имеет место для всех типов взаимодействий. Даже различие интенсивности сильных и электромагнитных взаимодействий получается как эффект спонтанного нарушения. Тем не менее, как будет видно ниже, особенно в § 7, п. 4, «остатки» этих исходных или, как их часто называют, высших симметрий убедительно проявляются во многих аспектах. На основе высших симметрий было сделано много оправдавшихся фундаментальных предсказаний (существование Ω -бариона (§ 4, п. 5), спектр шармония (§ 7, п. 5), существование слабых нейтральных токов и т. д.). Поэтому гипотеза о спонтанном нарушении симметрии вакуума пользуется всеобщим признанием, даже несмотря на то, что ее сколько-нибудь последовательная количественная трактовка до сих пор отсутствует.

§ 3. Классификация элементарных частиц

1. В этом пункте мы перечислим физические величины, характеризующие различные элементарные частицы. Как мы увидим, у элементарных частиц довольно много различных характеристик, причем среди них трудно выделить основную (подобную атомному номеру в периодической системе Менделеева). Это обстоятельство затрудняет классификацию элементарных частиц.

Основные характеристики элементарных частиц таковы: 1) масса m ; 2) спин J ; 3) электрический заряд Q ; 4) барионный заряд B ; 5) лептонные заряды L, L', L'' ; 6) странность S ; 7) шарм C ; 8) изотопический спин T ; 9) четность P ; 10) время жизни τ ; 11) статистика. Для полноты отметим, что у элементарных частиц существует и ряд других характеристик, таких как: 12) G -четность; 13) CP -четность; 14) зарядовая четность; 15) магнитный момент; 16) среднеквадратичный радиус распределения электрического заряда и т. д.

Изучаются также непрерывные характеристики, описываемые уже не дискретными числами, а функциями, например, распределения зарядов и магнитных моментов в частицах.

Мы видим, что список физических величин, характеризующих элементарную частицу, отличается от аналогичного перечня для

атомных ядер (см. гл. II, § 1). С одной стороны, такая величина, как несферичность, для элементарных частиц совершенно не изучена и неизвестно, существует ли вообще. С другой стороны, у элементарных частиц появляется ряд новых характеристик. Наконец, некоторые характеристики частиц существуют и у ядер, но под другими именами. Так, атомный номер Z ядра совпадает с его зарядом Q , а массовое число A — с барионным зарядом B .

2. Рассмотрим теперь основные свойства перечисленных выше характеристик.

Масса и спин отражают инертные и гравитационные свойства частиц. Массой также определяется запас энергии, имеющейся в частице. Массы всех частиц неотрицательны. В отношении спектров масс и спинов частиц в настоящее время имеются полуфеноменологические соображения, относящиеся лишь к отдельным группам частиц. Ряд подмеченных здесь эмпирических закономерностей, по-видимому, имеет глубокий физический смысл, так как с их помощью иногда удается предсказывать новые частицы (см. § 7).

Все строго сохраняющиеся заряды Q, B, L, L', L'' являются целочисленными и аддитивными. Электрические заряды гипотетических субчастиц — кварков — составляют $\frac{1}{3}$ и $\frac{2}{3}$ элементарного.

Странность S и шарм C , как мы уже говорили, похожи на заряды, но, в отличие от них, сохраняются не во всех взаимодействиях. То же относится к четности и изотопическому спину.

Периоды полураспадов элементарных частиц варьируются в довольно широких пределах. Стабильными (т. е. имеющими бесконечное время жизни) являются частицы с минимальными массами при заданных значениях всех сохраняющихся зарядов. Таких частиц известно всего девять. Сравнительно большим временем жизни ($T_{1/2} = 10,5$ мин) обладает нейтрон (и антинейтрон).

Времена жизни остальных частиц меняются от 10^{-6} с вплоть до характерного времени пролета 10^{-23} — 10^{-24} с. В отличие от атомных ядер, у частиц не наблюдались очень большие времена жизни. Это связано через соотношение неопределенностей с малостью радиусов частиц и со сравнительно большими энергиями, выделяющимися при распадах. Порядок времени жизни частицы определяется тем, каким фундаментальным взаимодействием обусловлен распад. Если распад обусловлен влиянием сильного взаимодействия, то время жизни ненамного превышает время пролета. Частицы, распадающиеся за счет электромагнитных взаимодействий, живут сравнительно долго, примерно 10^{-14} — 10^{-18} с. Это уже полноправные частицы, так как времена их жизни на много порядков больше времени пролета. Наконец, частицы, распад которых идет только за счет слабых взаимодействий, живут 10^{-10} с и дольше.

Принадлежность частиц той или иной статистике проявляется в определенных запретах для реакций и распадов с переходом в со-

стояния, содержащие не менее двух одинаковых частиц. Разделение всех частиц на бозоны и фермионы (гл. II, § 8, п. 4) проявляется и во многих других свойствах частиц. Например, все фермионы обязательно обладают ненулевыми значениями хотя бы одного из строго сохраняющихся зарядов.

Существование у частиц разного рода четностей приводит к правилам отбора, связанным с точным или приближенным сохранением этих четностей.

Характеристики, связанные с внутренней структурой частицы, у подавляющего числа частиц совершенно не изучены. Хорошо исследована только электромагнитная структура протона и нейтрона, о чем мы скажем в § 7, п. 11.

3. О том, какие из только что перечисленных характеристик выбрать за главные при классификации элементарных частиц, до сих пор нет единого мнения, потому что в разных конкретных вопросах главенствующую роль могут играть разные свойства частиц. Мы приведем здесь одну из самых употребительных классификаций. Прежде всего, для того чтобы иметь право называться частицей, микросистема должна прожить заметное время, намного превышающее характерное время пролета. По этому признаку все частицы можно разделить на настоящие частицы и резонансы. Настоящие частицы живут на много порядков дольше характерного времени и распадаются только за счет электромагнитных или слабых взаимодействий. Время жизни резонансов близко к характерному времени (10^{-23} — 10^{-24} с). Они распадаются под влиянием сильных взаимодействий. Разделение частиц на «настоящие» и резонансы не носит принципиального характера, а скорее обусловлено различиями в методах наблюдения, обилием резонансов, а также тем, что непрерывно открываются новые резонансы и время от времени закрываются некоторые открытые ранее в недостаточно надежных экспериментах. Если настоящие частицы еще доступны запоминанию любому физику-ядерщику, то список всех резонансов помнят только занимающиеся ими специалисты.

Пожалуй, самыми главными характеристиками частиц являются лептонный и барионный заряды, а также участие в различных фундаментальных взаимодействиях. Напротив, электрический заряд в классификации элементарных частиц играет второстепенную роль.

Элементарные частицы можно разделить на следующие классы:

а) *Фотон* (γ -квант). У фотона равны нулю все заряды, а также масса. Фотон не подвержен сильным взаимодействиям. Фотон имеет целый спин, равный единице, т. е. является бозоном.

б) *Лептоны*. Лептоны — относительно легкие частицы, имеющие ненулевой лептонный заряд (L или L' , или L'') и нулевой барионный заряд. Лептоны также не подвержены сильным взаимодействиям. Все лептоны имеют полуцелый спин, т. е. являются фермионами.

в) *Мезоны*. Частицы с нулевыми лептонным и барионным зарядами, участвующие в сильных взаимодействиях. Раньше объединяющим признаком мезонов являлось также то, что их массы имели значения, промежуточные между массами электрона и нуклона. Сейчас известны мезонные резонансы, массы которых превосходят нуклонную. Все мезоны имеют целый спин, т. е. являются бозонами.

г) *Барионы*. Частицы с ненулевым барионным и нулевым лептонным зарядами. Самыми легкими барионами являются протон и нейтрон, так что барионы — частицы тяжелые. Все барионы имеют полуцелый спин, т. е. являются фермионами.

Мезоны и барионы имеют общее название адронов — частиц, подверженных сильным взаимодействиям. Часто для классификации адронов используются странность и шарм. Адроны с нулевыми странностью и шармом называются обычными, адроны с ненулевой странностью — странными, с ненулевым шармом — шармированными. Если отбросить резонансные частицы (которые, конечно, все являются адронами), то классификация адронов по барионному заряду и странности примет такой вид:

в1) Пионы: $B = 0, S = 0$.

в2) Каоны: $B = 0, S = \pm 1$.

в3) Эта-мезон: $B = 0, S = 0$.

в4) Шармированные мезоны: $B = 0, S = 0, C = \pm 1$.

г1) Нуклоны: $B = \pm 1, S = 0$.

г2) Гипероны: $B = \pm 1, S = \pm 1, \pm 2, \pm 3$.

г3) Шармированные барионы *): $B = 0, S = 0, C = \pm 1$.

4. В заключение этого параграфа приведем полную таблицу всех известных «настоящих» (т. е. не являющихся резонансами) элементарных частиц с их основными квантовыми числами.

Поясним обозначения, принятые в этой таблице. Все частицы разделены на частицы и античастицы. Истинно нейтральные частицы, не имеющие античастиц, помещены в колонке обозначений посредине. Названия, как правило, приводятся только для частиц. Соответствующая античастица для барионов, нейтральных каонов и обоих сортов нейтрино получается просто прибавлением к названию частицы приставки «анти». Например: протон — антипротон, электронное нейтрино — электронное антинейтрино. «Антиэлектрон» имеет специальное название *позитрон*. По отношению к заряженным пионам и каонам термин античастица обычно не употребляется. Говорят просто о положительных и отрицательных пионах (каонах). Можно встретить и более старые наименования, такие как пи-плюс-мезон, К-минус-мезон и т. д. Почти все обозначения для приведенных в таблице физических величин уже объяснялись ранее.

*) В период представления настоящего издания (1978 г.) предсказывались теоретически, но обнаружены не были.

	Название	Обозначение		B	L	L'	L''	S	C	Масса M, МэВ	J ^P	T ^G	Q	Среднее время жизни, с	Способы распада и относительная вероятность (в %)
		частицы	античастицы												
Фотон	Фотон, гамма-квант	γ		0	0	0		0	0	0	1	—		стаб.	—
	Электрон, позитрон	e^-	e^+		± 1	0	0			0,511	$1/2^{\pm}$	—	± 1	стаб.	—
	Электронное нейтрино	ν_e	$\bar{\nu}_e$		± 1	0	0			0	$1/2$	—	0	стаб.	—
	Мюон	μ^-	μ^+		0	± 1	0			106	$1/2^{\pm}$	—	± 1	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ (100)
	Мюонное нейтрино	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	± 1	0	0	0	0	$1/2$	—	0	стаб.	—
	τ -мезон	τ^-	τ^+		0	0	± 1			1807	$1/2^{\pm}$	—	± 1	нестаб.	$\mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$, $e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau$ (40)
	τ -нейтрино	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$		0	0	± 1			0	$1/2$	—	0	стаб.	—
Пионы	Заряженный пион	π^+	π^-		0	0	0	0	0	140		1-	± 1	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu_\mu$ (100)
	Нейтральный пион	π^0		0	0	0	0	0	0	135				$0,76 \cdot 10^{-16}$	$\gamma + \gamma$ (99), $\gamma + e^+ + e^-$ (1)
Каоны	Заряженный каон	K^+	K^-							494			± 1	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu_\mu$ (63), $\pi^+ + \pi^0$ (21), $\pi^+ + \pi^0 + \pi^-$ (6), $e^+ + \pi^0 + \nu_e$ (5), $\mu^+ + \pi^0 + \nu_\mu$ (3), $\pi^+ + 2\pi^0$ (2)
	Нейтральный каон	K^0	\bar{K}^0	0	0	0	0	± 1	0	498	0-	$1/2$	0	K_S^0 $0,86 \cdot 10^{-10}$ K_L^0 $5,4 \cdot 10^{-8}$	$\pi^+ + \pi^-$ (69), $2\pi^0$ (31) $\pi^\pm + e^\mp + \nu_e$ (39) $\pi^\pm + \mu^\mp + \nu_\mu$ (27) $3\pi^0$ (21), $\pi^+ + \pi^- + \pi^0$ (13) $\pi^+ + \pi^-$ (0,16), $2\pi^0$ (0,12)

Таблица 7.3 (продолжение)

Название	Обозначение		B	L	L'	L''	S	C	Масса М _{эВ}	J ^P	T ^G	Q	Среднее время жизни, с	Способы распада и относительная вероятность (в %)
	Частичка	Античастица												
η-мезон	η		0	0	0	0	0	0	549	0 ⁻	0 ⁺	0	2,4 · 10 ⁻¹⁹	2γ (38), π ⁺ +π ⁻ +π ⁰ (24) 3π ⁰ (30), π ⁰ +2γ (3), π ⁺ +π ⁻ +γ (5)
D ⁺ -мезон	D ⁺	D ⁻	0	0	0	0	0	±1	1868					K ⁻ π ⁺ π ⁺ (3,9), K ⁰ π ⁺ (1,5), e ⁺ +... (9,8)
D ⁰ -мезон	D ⁰	\bar{D}^0	0	0	0	0	0	±1	1863					K ⁻ π ⁺ (1,8), K ⁰ π ⁰ (1,2), K ⁻ π ⁺ π ⁺ (3,5), K ⁰ π ⁺ π ⁻ (4,4), e ⁺ +... (9,8)
F-мезон	F	\bar{F}	0	0	0	0	0	±1	±1	2030				
Липероны	Протон	p	±1	0	0	0	0	0	938,2	1/2 ±	1/2	±1	стаб.	—
	Нейтрон	n	±1	0	0	0	0	0	939,6	1/2 ±	1/2	0	0,93 · 10 ⁸	p+e ⁻ +ν _e
	Ламбда-гиперон	Λ							1116		0	0	2,5 · 10 ⁻¹⁰	p+π ⁻ (65), n+π ⁰ (35)
	Сигма-плюс-гиперон	Σ ⁺	Σ ⁺	±1	0	0	±1	0	1189	1/2 ±	1	±1	0,8 · 10 ⁻¹⁰	p+π ⁰ (52), n+π ⁺ (48)
Сигма-нуль-гиперон	Σ ⁰	Σ ⁰	±1	0	0	±1	0	1192	1/2 ±	1	0	< 10 ⁻¹⁴	Λ+γ (100)	
Сигма-минус-гиперон	Σ ⁻	Σ ⁻	±1	0	0	±1	0	1197	1/2 ±	1	±1	1,5 · 10 ⁻¹⁰	n+π ⁻	
Каскадные гипероны	Кси-нуль-гиперон	Ξ ⁰	Ξ ⁰						1315		0	0	3 · 10 ⁻¹⁰	Λ+π ⁰
	Кси-минус-гиперон	Ξ ⁻	Ξ ⁻	±1	0	0	±2	0	1321	1/2 ±	1/2	±1	1,7 · 10 ⁻¹⁰	Λ+π ⁻
	Омега-минус-гиперон	Ω ⁻	Ω ⁻	±1	0	0	±3	0	1672	3/2 ± (2)	0	—	1,3 · 10 ⁻¹⁰	Ξ+π (≈ 50), Λ+K ⁻ (≈ 50)

Новыми являются только обозначения J^P и T^G . Первое из них обозначает четность (P) и спин (J) частицы. Например, для пионов $J^P = 0^-$. Это означает, что спин пиона равен нулю, а его четность отрицательна. Аналогично через T^G обозначены изотопический спин и G -четность. Например, у эта-мезона изотопический спин равен нулю, а G -четность положительна. Массы частиц, как это сейчас принято, приводятся в энергетических единицах (МэВ). Раньше за единицу массы элементарных частиц принималась масса электрона. Поскольку масса электрона равна 0,5 МэВ, то для того чтобы узнать, сколько электронным массам равна масса частицы, надо ее массу в мегаэлектронвольтах умножить на два. Если какая-то характеристика для частицы не указывается, то это значит, что она для этой частицы не может быть определена. Например, лептоны не обладают изотопическим спином, потому что они не участвуют в сильных взаимодействиях. Если для физической величины указаны два знака, то верхний относится к частице, а нижний — к античастице. Например, барионный заряд равен единице для барионов и минус единице для антибарионов. Заметим, в частности, что четности частиц и античастиц одинаковы для бозонов и противоположны для фермионов. Указанные в последней графе способы распада приведены для частиц. Античастицы распадаются на соответствующие античастицы.

Появление частиц K_S^0 и K_L^0 в клетках для времен жизни и способах распада нейтральных каонов мы объясним в § 8, п. 8.

Стоит обратить внимание на то, что все восемь мезонов имеют одинаковые спин и четность. То же имеет место и для восьми барионов (для всех, кроме Ω^- -гиперона). Из этих закономерностей делаются далеко идущие выводы (см. § 7, п. 4).

В конце книги приведена полная таблица всех известных элементарных частиц, включающая многочисленные резонансы (см. приложение IV).

§ 4. Кинематика и законы сохранения зарядов в реакциях и распадах элементарных частиц

1. В этом параграфе мы рассмотрим более детально ограничения, налагаемые на реакции взаимопревращения элементарных частиц механическими законами сохранения и законами сохранения зарядов. Мы начнем с вывода общей формулы для энергетических порогов различных реакций. Сравнив эту формулу с выведенной в гл. IV, § 2, мы увидим, что релятивистские эффекты приводят к резкому увеличению различия между порогом и энергией реакции. Далее мы коснемся одного общего свойства угловых распределений релятивистских реакций. После этого мы перейдем к рассмотрению вытекающих из законов сохранения зарядов правил отбора, называемых иногда алгеброй реакций.