

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

§ 129. Элементарные частицы и их свойства

В настоящее время открыто большое число (порядка двухсот) элементарных частиц, которые способны превращаться друг в друга, но не состоят, в обычном смысле этого слова, из более мелких элементов. Все их можно разделить на две большие группы — *стабильные* и *короткоживущие* (резонансы). Первый термин является весьма условным, так как в группу стабильных частиц наряду, например, с электроном, который живет бесконечно долго, входит и π^0 -мезон, время жизни которого порядка 10^{-16} сек. Стабильность понимается лишь в том смысле, что соответствующие частицы живут гораздо дольше характерного времени 10^{-24} — 10^{-23} сек, за которое световой сигнал проходит типичное для «размеров» элементарных частиц расстояние 10^{-13} см.

Стабильные частицы разбиваются на следующие четыре класса:

1) класс *фотонов*, включающий кванты классических полей; сюда относится сам фотон — квант электромагнитного поля, и иногда гравитон — квант гравитационного поля;

2) класс *лептонов* (легких частиц) содержит электрон, мюон, который раньше неудачно называли μ -мезоном, два нейтрино (электронное и мюонное) и четыре соответствующие античастицы; электронное нейтрино образуется при распаде нейтрона, а мюонное нейтрино — мюона:

$$p \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e; \quad \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

(тильда отличает античастицы от соответствующих им частиц);

3) в класс *мезонов* (частиц средней массы) входят 3π -мезона (π^- является античастицей к π^+ , а частицы и античастица для π^0 тождественны), $4K$ -мезона (две частицы и две античастицы) и 1η -мезон (являющийся сам себе античастицей);

4) класс *барионов* (тяжелых частиц) содержит два нуклона (протон и нейтрон), 1Λ -гиперон, 3Σ -гиперона, 2Ξ -гиперона, 1Ω -гиперон и соответствующие им античастицы (см. табл. на стр. 594—595).

Само название «резонанс» возникло в связи с тем, что сведения о короткоживущих частицах первоначально были получены из опытов с рассеянием. Наблюдались характерные резонансные максимумы в полном сечении при определенных значениях энергии рассеивающихся частиц. Так, например, в опытах с рассеянием π -мезонов было обнаружено существование ρ -мезона.

В группу короткоживущих частиц входят только барионные и мезонные резонансы — всего более 150 частиц. Среди них наиболее важными являются мезоны $\omega(1)$, $\phi(1)$, $\rho(3)$, $K^*(4)$, и барионные резонансы $\Delta_{1236}(4)$, $\Sigma_{1385}(3)$, $\Xi_{1530}(2)$ со своими античастицами. Кроме того, интересен f -мезон, теоретически предсказанный И. Я. Померанчуком и впоследствии обнаруженный экспериментально.

Совокупность всех мезонов и барионов и их резонансов образует большую группу частиц, которые в настоящее время называются *адронами*. Начинает входить в научный обиход и термин *аденоны*, относящийся к лептонам и фотону.

Перечислим кратко основные свойства элементарных частиц.

1. Каждая частица обладает *массой покоя*, которая измеряется в мэвах. Диапазон значений масс различных частиц весьма широк — от 0 (фотон и нейтрино) до 3000 мэв и выше (Δ_{3230}). Первоначальная классификация частиц (разбиение на четыре указанных класса) была основана именно на значениях их масс. Но оказалось, что этот признак, как и масса атомов в периодической системе элементов, является достаточно случайным. Особенно ясно это видно на примере резонансных состояний.

2. Важной характеристикой частицы является значение ее *спина* σ . Фотон имеет спин 1 (с некоторыми оговорками, так как его масса покоя равна нулю). Лептоны обладают спином $1/2$, стабильные мезоны — спином 0, барионы (кроме Ω) — спином $1/2$, Ω -гиперон — спином $3/2$. Среди резонансов имеются частицы со значениями спина от 0 до $19/2$. Спин выписанных выше мезонных резонансов (кроме f) равен 1, барионных резонансов — $3/2$, спин f -мезона равен 2. Согласно теореме Паули — Людерса, которая доказана на основе самых общих принципов, не зависящих от конкретной динамики, спин частицы однозначно определяет тип статистики: частицы с полуцелым спином (лептоны, барионы и барионные резонансы) подчиняются статистике Ферми — Дирака, а частицы с целым спином (фотон, мезоны и мезонные резонансы) — статистике Бозе — Эйнштейна. Кроме того, спин частицы определяет трансформационные свойства ее волновой функции по отношению к собственным преобразованиям Лоренца. Частицы со спином 0 описываются (псевдо)

скалярной волновой функцией, со спином $1/2$ — спинорной волновой функцией, со спином 1 — (псевдо) векторной волновой функцией и т. д.

3. Четность P -частицы определяет трансформационные свойства волновой функции относительно преобразования пространственной инверсии. Все стабильные мезоны имеют отрицательную четность, и обладая спином 0 , описываются псевдоскалярной волновой функцией. Мезонные резонансы спина 1 (ω , ϕ , ρ , K^*) также имеют отрицательную четность; так как при пространственной инверсии компоненты вектора меняют знак, то волновая функция этих частиц является векторной. Четность f -мезона положительна. Барионам и их резонансам можно приписать только относительную четность. Если по определению принять, что четности протона, нейтрона и Λ -гиперона положительны, то четности всех перечисленных выше барионов и их резонансов будут также положительными, а четности антибарионов — отрицательными.

4. Каждая частица характеризуется величиной *электрического заряда*, который (заряд электрона принимается равным -1) может принимать лишь целочисленные значения. В настоящее время известно множество нейтральных частиц и частиц с зарядом, равным по абсолютной величине единице. Заряд шести частиц (Δ -резонансов) равен $+2$.

5. Для характеристики элементарных частиц вводятся *лептонное число* L и *барионное число* B . По определению, для лептонов $L = +1$, $B = 0$, для антилептонов $L = -1$, $B = 0$, для барионов $L = 0$, $B = +1$, для антибарионов $L = 0$, $B = -1$, для мезонов и фотона $L = B = 0$. Во всех реакциях с участием элементарных частиц эти квантовые числа сохраняются, что и обуславливает их важность.

6. Все адроны разбиваются на небольшие семейства, члены которого обозначаются одним символом (например, π). Эти семейства называются *изомультиплетами*. Частицы, входящие в их состав, обладают примерно одинаковыми массами, но имеют разные заряды. Каждому изомультиплету приписывается определенное значение *изоспина* T , который определяет число членов мультиплета

$$N = 2T + 1.$$

Таким образом, изоспин нуклона и K -мезона равен $1/2$, изоспин Σ -гиперона и π -мезона равен 1 , изоспин Δ -резонанса равен $3/2$ и т. д.

7. Различные частицы, входящие в состав одного изомультиплета, отличаются друг от друга значениями *проекции* T_3 *изоспина* на воображаемую третью ось фиктивного изопространства. В зависимости от значения изоспина T , его проекция T_3

может принимать целые или полуцелые значения. Понятие изоспина первоначально было введено лишь для нуклона и пиона. В этом случае T_3 следующим образом связано с величиной электрического заряда частицы:

$$Q = T_3 + 1/2(B). \quad (129,1)$$

8. После открытия К-мезонов и гиперонов (так называемых странных частиц) возникла необходимость в модификации предыдущей формулы:

$$Q = T_3 + 1/2(B + S) \quad (129,2)$$

(соотношение Гелл-Манна — Нишиджимы). Новое квантовое число S получило название *странности*. В широком круге явлений, например, в реакциях рождения адронов, странность сохраняется, что сразу же позволило объяснить некоторые непонятные особенности этих процессов (скажем, то, что странные частицы всегда рождаются парами). В последние годы вместо странности физики предпочитают использовать другое квантовое число — *гиперзаряд* Y , тесно связанный с S :

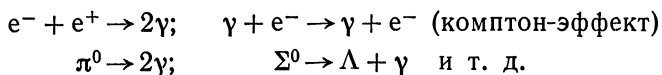
$$Y = B + S. \quad (129,3)$$

На некоторых других квантовых числах, которые вводятся для характеристики элементарных частиц (временная и зарядовая четности, G -четность, мюонный заряд и т. д.), мы останавливаться не будем.

§ 130. Типы взаимодействий элементарных частиц

Элементарные частицы могут участвовать в самых различных взаимодействиях: частица аннигилирует с античастицей, при столкновении быстрых частиц происходит их рассеяние и рождаются новые частицы, многие частицы нестабильны и распадаются и т. д. В настоящее время известно четыре типа взаимодействия элементарных частиц, резко различающихся друг от друга интенсивностью и другими свойствами.

1. *Электромагнитное* взаимодействие — взаимодействие заряженных частиц с фотонами, а через их посредство и друг с другом. За счет виртуальных процессов в электромагнитном взаимодействии могут принимать участие и нейтральные частицы. Примерами реакций, которые вызывают электромагнитное взаимодействие, являются превращения:



Электромагнитное взаимодействие имеет бесконечный радиус действия; для реакций, которые оно вызывает, характерны