

же физики предпочитают говорить о них просто как о микро частицах.

Значит ли это, что мы вправе считать микрочастицы, или хотя бы часть их, просто системами, состоящими из каких-то первичных частиц? Уверенного ответа на этот вопрос пока нет. Это фронт современной физики, и мы можем лишь кратко осветить положение дел на нем.

Попытаемся, во-первых, установить возможный критерий элементарности.

Среди десятков известных микрочастиц всего несколько устойчивых, неспособных к самопроизвольным превращениям. Не являются ли они исходным строительным материалом всех других микрочастиц? Другими словами, не является ли устойчивость по отношению к самопроизвольным превращениям признаком элементарности?

Ядро дейтерия состоит из протона и нейтрона. Как частица, дейтон совершенно устойчив. В то же время составная часть дейтона, нейтрон,  $\beta^-$ -радиоактивен, т. е. неустойчив. Этот пример показывает, что понятия устойчивости и элементарности — не тождественны.

В качестве предварительного определения примем следующее, принадлежащее Гелл-Манну, Розенфельду и Чу: «Частица не является элементарной, если все ее свойства могут быть в принципе рассчитаны в предположении, что она — составная».

К сожалению, теория микрочастиц развита недостаточно, чтобы можно было, применяя этот критерий, определить, является ли данная микрочастица элементарной или составной.

Естественно, что настоящая глава не может иметь законченного вида, но представляет лишь обзор известного, проблем и гипотез.

Мы начнем обзор современного состояния физики микрочастиц с рассмотрения известных взаимодействий между ними.

## § 71. Типы взаимодействий

В нашем курсе рассматривалось три типа различных по своей природе взаимодействий: гравитационное (т. I), электромагнитное (т. II) и ядерное (т. III). Эти три взаимодействия не исчерпывают всех ныне известных. Особое взаимодействие сказывается во всех процессах, в которых принимают участие нейтрино. Каковы особенности четырех перечисленных видов взаимодействия?

Наиболее сильным является взаимодействие между ядерными частицами («ядерные силы»; см. § 64). Это взаимодействие принято называть с и л ь н ы м. Уже отмечалось, что ядерные силы действуют лишь при весьма малых расстояниях между частицами: радиус действия порядка  $10^{-13}$  см.

Следующим по величине является электромагнитное взаимодействие. Оно меньше сильного на два порядка. Но с расстоянием оно меняется медленно, как  $1/r^2$ , так что радиус действия электромагнитных сил бесконечен.

Далее следует взаимодействие, обусловленное участием в реакциях нейтрино. По порядку величины эти взаимодействия меньше сильных в  $10^{14}$  раз. Эти взаимодействия принято называть *слабыми*. По-видимому, радиус действия здесь такой же, как и в случае сильного взаимодействия.

Самое малое из известных взаимодействий — гравитационное. Оно меньше сильного на 39 порядков — в  $10^{39}$  раз! С расстоянием гравитационные силы убывают столь же медленно, как и электромагнитные, так что их радиус действия также бесконечен. Чрезвычайная малость гравитационных сил позволяет игнорировать их в физике микрочастиц. Заметим, что по мнению многих физиков ситуация эта — временная.

Из сказанного следует также, почему в космосе основная роль принадлежит гравитационным взаимодействиям. Радиус действия сильных и слабых взаимодействий ничтожен. Электромагнитные взаимодействия играют ограниченную роль потому, что существуют электрические заряды двух знаков и заряженные частицы стремятся к образованию нейтральных систем, поле которых (за исключением порождаемого ими излучения) локализовано в них самих. Гравитационные «заряды» — массы — всегда одного и того же знака, гравитационные силы — всегда силы притяжения. Их нельзя скомпенсировать силой обратного знака, от них нельзя экранироваться. Отсюда — их доминирующая роль в космосе.

В соответствии с величиной сил взаимодействия отлично и время, необходимое для осуществления реакции, обусловленной этим взаимодействием. Так, для осуществления реакции, происходящей в результате сильного взаимодействия, требуется время порядка  $10^{-23}$  сек. Действительно, в результате действия этих сил реакция успевает произойти при столкновении частиц больших энергий, относительная скорость которых близка к *c*. При такой скорости время, в течение которого частицы взаимодействуют, есть радиус действия ядерных сил, деленный на скорость света:

$$\sim 3 \cdot 10^{-13} / 3 \cdot 10^{10} \approx 10^{-23} \text{ сек.}$$

Время, необходимое для осуществления процесса, реализуемого в результате электромагнитного взаимодействия, в соответствии с его величиной больше на два порядка, составляя  $\sim 10^{-21}$  сек. Процессы, обусловленные слабым взаимодействием, требуют времени большего, чем в случае сильных, на 14 порядков, т. е.  $\sim 10^{-9}$  сек.

Как мы уже отмечали, сейчас нельзя сказать, сказываются ли, и сколь существенно, гравитационные силы на самой структуре

микрочастиц. Но, по-видимому, можно утверждать, что в реакциях, обусловленных взаимодействиями частиц, гравитационные силы практически никакой роли не играют: как это видно из прилагаемой таблицы, характерное время слишком велико.

Типы взаимодействия	Относительная величина	Характерное время, сек
Сильное . . . . .	1	$10^{-23}$
Электромагнитное . . . . .	$10^{-2}$	$10^{-21}$
Слабое . . . . .	$10^{-14}$	$10^{-9}$
Гравитационное . . . . .	$10^{-39}$	$10^{+18}$ ( $\approx 3 \cdot 10^8$ лет)

Перечисленные взаимодействия имеют, по-видимому, разную природу, т. е. не сводимы одно к другому. В настоящее время нет возможности судить, исчерпывают ли указанные взаимодействия все имеющиеся в природе.

С вопросом о взаимодействиях тесно связан вопрос о зарядах. Поясним его на примере хорошо известного электрического заряда.

Наличие электрических зарядов у частиц означает, что между этими частицами имеет место специфическое электромагнитное взаимодействие. Электрический заряд частицы выступает здесь как «константа связи», характеризую взаимодействия частиц с электромагнитным полем и через него — друг с другом. Существенно, что электрические заряды удовлетворяют строгим законам сохранения \*).

Можно предположить, что другим типам взаимодействий отвечают свои специфические «заряды», например сильному — я д е р н ы й или б а р и о н н ы й заряд (понятие о барионном заряде было впервые введено Штукельбергом в 1938 г.). Как показывает опыт, барионный заряд удовлетворяет строгому закону сохранения. В 1953 г. Зельдович ввел представление о строго сохраняющемся н е й т р и н н о м заряде. Сейчас известны два типа нейтрино, так что, по-видимому, таких зарядов следует ввести два.

\*) Заметим, что эти законы сохранения совершенно иной природы, чем законы сохранения энергии, импульса и момента импульса. Можно доказать совершенно строго, что закон сохранения энергии есть прямое следствие «однородности» времени (законы природы не меняются со временем). Из однородности пространства относительно переносов (независимость законов природы относительно сдвига начала координат) следует закон сохранения импульса. Наконец, из однородности пространства в смысле поворотов системы отсчета следует закон сохранения момента импульса. Закон сохранения электрического заряда имеет другую природу. Мы будем говорить в дальнейшем о законе сохранения электрического и других зарядов как о прямых следствиях опыта.

Из закона сохранения зарядов следует, что заряженная частица не может возникнуть без того, чтобы не возникла другая с зарядами обратных знаков (так, чтобы суммарный заряд всей системы частиц не менялся). Примером такой реакции является превращение нейтрона в протон (см. § 62). При этом рождаются еще две частицы — электрон и нейтрино. Электрический заряд (не говоря пока что о других) при этом превращении сохраняется. Точно так же сохраняется он при превращении фотона в пару электрон — позитрон (см. § 59) или при рождении такой же «пары» в результате столкновения двух электронов.

Подобных реакций, притом для частиц самой различной природы, известно сейчас множество. Частицы таких пар обладают всегда тождественными массами покоя, спинами, если они неустойчивы — средним временем жизни. Но знаки всех зарядов компонент пары — обратны. В таких парах одна частица является античастицей по отношению к другой (какую назвать частицей, какую античастицей — безразлично).

При столкновении частицы и античастицы они могут взаимно уничтожиться — «аннигилировать». При этом соблюдаются, конечно, все известные законы сохранения — энергии, импульса, момента импульса (при аннигиляции пары закон сохранения зарядов выполняется автоматически).

Для рождения пары электрон — позитрон необходимо израсходовать энергию, не меньшую суммы собственных энергий этих частиц, т. е.  $\sim 10^6$  эв. При аннигиляции такой пары эта энергия (а если есть — и кинетическая), а также импульс и момент импульса (спины компонент пары) отдаются либо с порождаемым при аннигиляции излучением, либо распределяются среди других частиц. Электрон и протон не могут родиться в паре или аннигилировать, ибо такой переход означал бы нарушение закона сохранения барионного заряда.

Связь природы частиц и античастиц сейчас хорошо известна. Мы рассмотрим ее в следующем параграфе.

## § 72. Частицы и античастицы

Уравнение Шредингера (47.21) описывает микрочастицы любой природы в ньютоновом приближении, т. е. без учета требований теории относительности. Можно показать, что эти уравнения переходят в уравнения обычной механики Ньютона в предельном случае, когда величиной постоянной Планка можно пренебречь ( $\hbar \rightarrow 0$ ). Величины, характеризующие частицу (масса, заряд), вводятся в уравнение, но не следуют из него. Когда был открыт спин электрона, Паули ввел его в уравнение Шредингера таким же образом, добавив к оператору энергии член, учитывающий