

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

энергию взаимодействия магнитного спинового момента электрона с магнитным полем. Однако вскоре ситуация радикально изменилась.

В 1928 г. английский физик П. А. Дирак показал, какой вид должно иметь уравнение микрочастицы, удовлетворяющее требованиям теории относительности. Оказалось, что в уравнение

Дирака спин вводить не нужно — его существование и величина следуют автоматически из самого уравнения. В дальнейшем выяснилось также, что возможны релятивистские волновые уравнения разной формы, отвечающие различным значениям спинов частиц. Уравнение Дирака оказалось применимым как раз к электрону.

При решении уравнения Дирака для свободного электрона выяснилось удивительное обстоятельство. Наряду с решениями, отвечающими положительной полной энергии свободной частицы (см. (29.15))

$E = + \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$, меняющейся в пределах $m_0 c^2 \leq E \leq +\infty$, имеются решения с отрицательной энергией, которая может иметь значения $E = - \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$, т. е. может иметь любые значения в пределах $-\infty \leq E \leq -m_0 c^2$.

Энергия свободного электрона может принимать значения, показанные на рис. 3.29 от $-\infty$ до $-m_0 c^2$ и затем от $+m_0 c^2$ до $+\infty$. Свободные электроны с отрицательной энергией никогда не наблюдались.

Первые попытки обойти эту трудность состояли в том, чтобы просто исключить такие решения уравнения, как не имеющие физического смысла. Было ясно, почему в классической физике такая трудность не возникает. В классической физике все величины, энергия в том числе, меняются непрерывно. Уменьшение энергии может происходить только до $+m_0 c^2$. Дальнейшее уменьшение может произойти только скачком, на величину, не меньшую $2m_0 c^2$ (от $+m_0 c^2$ до $-m_0 c^2$, что для электрона составляет 1,024 МэВ), а скачкообразных изменений величин в классической физике нет. Но в квантовой механике скачкообразные переходы существуют и так просто отказаться от удивительных состояний с $E < 0$ нельзя. Более того, попытка исключить их из рассмотрения, исключив переходы в состояния с $E < 0$,

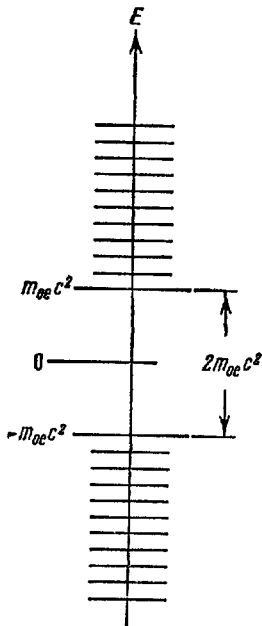


Рис 3 29

привела к противоречию теории и опыта. При расчете сложных процессов учет возможности таких состояний приводит к соответствию теории с опытом. Поэтому состояния с $E < 0$ отбросить нельзя, но следует найти правильную их интерпретацию. Возможны две интерпретации этих состояний.

1. Первая интерпретация этих состояний была предложена Дираком в 1932 г.

Согласно представлениям Дирака изменение знака энергии свободного электрона обусловлено изменением знака его массы покоя m_{0e} . Свойства частицы с отрицательной массой покоя совершенно необычны. Так, например, при $m_{0e} < 0$ вектор скорости частицы и вектор ее импульса направлены всегда в противоположные стороны!

Такие частицы никогда не наблюдались. Дирак преодолевает эту трудность с помощью следующего рассуждения.

Электроны подчиняются запрету Паули — в каждом состоянии может находиться только один электрон. Предположим, что все состояния, отвечающие отрицательным энергиям свободных электронов, заняты. Такое распределение электронов, отвечающее вакууму, показано на рис. 3.30. Оно относится к каждой точке пространства. Это означает, что в каждой точке пространства должна быть бесконечно большая плотность электронов с отрицательной массой покоя, а значит, и бесконечно большой отрицательный электрический заряд. Однако это удивительное распределение электронов ускользает от непосредственного наблюдения: ведь плотность этих «вакуумных» электронов совершенно одинакова во всех точках пространства. Отдельные точки пространства в этом смысле будут совершенно тождественны, а следовательно, физически неразличимы. Как это будет видно из дальнейшего, наличие вакуумных электронов приведет к ряду очень важных следствий.

Таким образом, согласно Дираку, вакуум означает не отсутствие электронов, но такое их распределение, при котором все состояния с положительной собственной энергией $m_e c^2 = \frac{m_{0e} c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ вакантны, а все состояния с отрицательной собственной энергией $m_e c^2 = \frac{-m_{0e} c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ заняты.

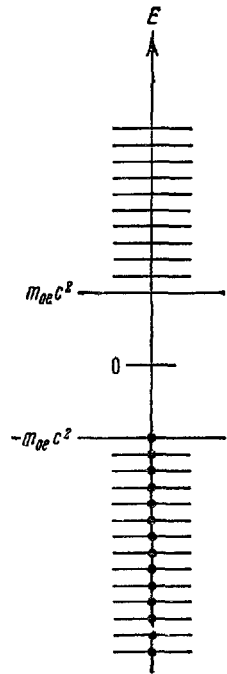


Рис. 3.30.

Если в результате какого-либо взаимодействия один из этих вакуумных электронов получит достаточную энергию (превышающую $2m_0e c^2$ (рис. 3.31)), то он перейдет в состояние с положительной энергией. Следовательно, после перехода появится:

- 1) один обычный электрон с положительной энергией;
- 2) неоднородность в распределении «вакуумных» электронов — одно из мест окажется вакантным. Такая неоднородность в их

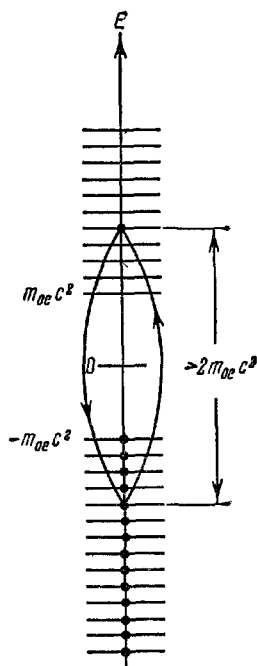


Рис 3.31.

распределении, или, согласно принятой терминологии, «дырка», будет наблюдаема. Отсутствие отрицательной массы будет проявляться как наличие равной ей по величине положительной массы. Отсутствие отрицательного заряда будет эквивалентно наличию положительного заряда такой же величины. Следовательно, «дырка» в распределении вакуумных электронов будет обладать свойствами обычной частицы с положительной массой покоя, равной массе покоя электрона, но с обратным по знаку зарядом, т. е. свойствами позитрона.

Таким образом, описанный процесс, при котором один из вакуумных электронов переходит в обычное состояние, означает возникновение пары электрон — позитрон. Заметим, что собственная энергия каждой из этих частиц равна $m_0e c^2$ и, следовательно, для образования пары необходима энергия, не меньшая $2m_0e c^2$. Но именно такая энергия и должна быть затрачена, по Дираку, для «подъема» вакуумного электрона, как это видно из рис. 3.31 (стрелка справа).

Обратный переход показан на том же рис. 3.31 (стрелка слева). При таком переходе обычный электрон замещает дырку в распределении вакуумных электронов. Следовательно, он «исчезает» (как наблюдаемая частица), а вместе с ним исчезает и неоднородность в распределении вакуумных электронов — дырка, т. е. позитрон.

Этот процесс наблюдается как аннигиляция пары. Как видно из рисунка, процесс связан с выделением энергии $>2m_0e c^2$. При отсутствии других частиц эта энергия отдается в виде двух или трех фотонов (в зависимости от относительного направления спинов аннигилирующих частиц).

Интерпретация состояний свободной частицы с отрицательной собственной энергией, данная Дираком, показала связь этих состояний с существованием «антиэлектрона» или позитрона, открытого экспериментально в 1932 г. Однако эта интерпретация приводит к ряду трудностей и, как это будет видно из дальнейшего, непоследовательна.

В числе этих трудностей — бесконечная энергия взаимодействия каждой реальной частицы со всеми вакуумными электронами. Пренебречь этим взаимодействием нельзя, ибо только оно и ответственно за переходы вакуумных электронов, трактуемые как образование пар. Поэтому расчет любого реального процесса такого типа связан с необходимостью исключения бесконечностей, лишенных физического смысла.

Следует иметь в виду, что античастицы есть не только у электронов. Античастицы существуют у всех без исключения микрочастиц*). Следовательно, для объяснения существования ныне уже открытых антипротона, антинейтрона и многих других античастиц следовало бы предположить, что в каждой точке свободного от обычных частиц пространства — вакуума — имеется бесконечная плотность не только электронов отрицательной собственной энергии, но и подобных протонов, нейтронов и всех прочих частиц.

Но даже столь удивительное предположение (со всеми вытекающими из него трудностями, представление о которых дано в приведенном выше примере) не дает единой картины для трактовки античастиц: ведь целый ряд частиц не подчиняется запрету Паули, следовательно, для них не существует понятия «занятого состояния», так что существование у них античастиц приходится объяснять иначе.

2. Вторая интерпретация (а из дальнейшего будет видно, что возможны лишь две) была предложена в 1940 г. автором этих строк. Она основана на более последовательном, чем у Дирака, использовании релятивистских представлений, с которых мы и начнем.

В § 29 было показано, что масса частицы не является постоянной величиной, но зависит от скорости частицы v по отношению к выбранной системе отсчета: $m_e = \frac{m_{0e}}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$. Следовательно, импульс частицы имеет вид

$$p_e = m_e \frac{dr}{dt} = \frac{m_{0e}}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \cdot \frac{dr}{dt}. \quad (72.1)$$

Введем теперь вместо времени t выбранной по произволу инер-

*) Лишь у некоторых (не всех!) абсолютно нейтральных частиц античастица тождественна с частицей; см. далее § 73.

циальной системы отсчета другое время — «собственное время электрона». Это — время в системе отсчета, которую следует представлять себе жестко связанной с электроном (иначе говоря, в такой подвижной системе отсчета, по отношению к которой электрон всегда покоится). Конечно, такая система отсчета неинерциальна, однако за бесконечно малое время dt изменением скорости можно пренебречь, считая, что в течение времени dt система инерциальна. В следующий момент времени нашей ускоренной системе отвечает, опять-таки на мгновение, другая инерциальная система, и т. д. Это означает, что соотношение между временами исходной инерциальной системы отсчета и собственной системы электрона, т. е. между временем t и собственным временем электрона, которое мы обозначим через τ , следует писать не для конечных промежутков времени, но для бесконечно малых dt и $d\tau$. Согласно (27.5) имеем

$$d\tau = \sqrt{1 - v^2/c^2} dt, \quad (72.2)$$

где v — скорость электрона по отношению к выбранной системе отсчета (v может быть и переменной величиной).

Обратим теперь внимание на то, что в знаменателе формулы (72.1) стоит как раз величина (72.2), так что выражение для импульса электрона можно переписать так:

$$\mathbf{P}_e = \frac{m_{0e} d\mathbf{r}}{\sqrt{1 - v^2/c^2} dt} = m_{0e} \frac{d\mathbf{r}}{d\tau}. \quad (72.3)$$

Подчеркнем, что m_{0e} здесь уже не переменная масса, но неизменная величина — «инвариант» — масса покоя электрона. Итак: *импульс частицы есть произведение ее массы покоя и производной от ее радиуса-вектора по собственному времени.*

Обратимся теперь к релятивистскому выражению для собственной энергии электрона (т. е. энергии, не содержащей величин, отвечающих взаимодействию с другими частицами), включающей энергию покоя и кинетическую энергию (см. (29.15) и (29.16)):

$$E = m_e c^2 = \frac{m_{0e} c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (72.4)$$

Из формулы (72.2) следует, что

$$\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{dt}{d\tau}. \quad (72.5)$$

Вводя новую величину, имеющую размерность импульса: $p_t = \frac{E}{c}$, можем, воспользовавшись (72.5), переписать (72.4) так:

$$p_t = \frac{E}{c} = \frac{m_{0e} c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = m_{0e} \frac{dct}{d\tau}. \quad (72.6)$$

Формулы (72.3) и (72.6) показывают, что можно ввести два четырехмерных вектора:

$$\mathbf{R} \rightarrow (ct, x, y, z) \quad (72.7)$$

(все составляющие \mathbf{R} , в том числе ct , имеют размерность длины);

четырёхмерный вектор импульса частицы \mathbf{P} с составляющими

$$\mathbf{P} \rightarrow \left(p_t = \frac{E}{c}, p_x, p_y, p_z \right) \quad (72.8)$$

(составляющая p_t также имеет размерность импульса), причем четырехмерный импульс выражается через четырехмерный радиус-вектор так:

$$\mathbf{P} = m_{0e} \frac{d\mathbf{R}}{d\tau}. \quad (72.9)$$

Таким образом, в теории относительности энергия (деленная на c) представляет собой одну из составляющих (временную) четырехмерного вектора импульса и должна трактоваться в соответствии с этим. Подчеркнем еще раз, что величина m_{0e} есть инвариант — масса покоя частицы, которая не меняется ни по величине, ни по знаку, т. е. всегда положительна.

Рассмотрим две составляющие четырехмерного вектора импульса

$$p_t = \frac{E}{c} = m_{0e} \frac{dc t}{d\tau} \quad (72.10)$$

и

$$p_x = m_{0e} \frac{dx}{d\tau}.$$

Посмотрим, что означает изменение знака составляющей p_x , с тем, чтобы проанализировать, нельзя ли трактовать изменение знака составляющей p_t , т. е. энергии, аналогичным образом?

На рис. 3.32 представлен график движения электрона (на языке математика, создавшего геометрию теории относительности — Минковского — «мировая линия» электрона) для случая, когда p_x меняет знак. Направление возрастания собственного времени электрона τ показано на его мировой линии стрелками.

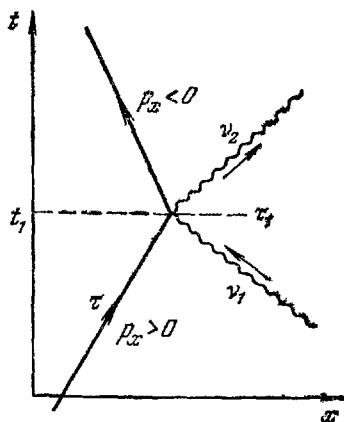


Рис. 3.32.

Пусть до момента времени $\tau = \tau_1$ (соответственно $t = t_1$) частица движется вдоль оси x в положительном направлении, так что

$$\text{при } \tau < \tau_1 \quad p_x = m_{0e} \frac{dx}{d\tau} > 0, \quad \text{т. е. } \frac{dx}{d\tau} > 0, \quad (72.10a)$$

а после этого момента начинает двигаться обратно, так что с ростом τ координата x убывает:

$$\text{при } \tau > \tau_1 \quad p_x = m_{0e} \frac{dx}{d\tau} < 0, \quad \text{т. е. } \frac{dx}{d\tau} < 0. \quad (72.10b)$$

Рассматриваемая величина p_x состоит из двух множителей, m_{0e} и $\frac{dx}{d\tau}$. Формально изменение знака p_x может быть обусловлено

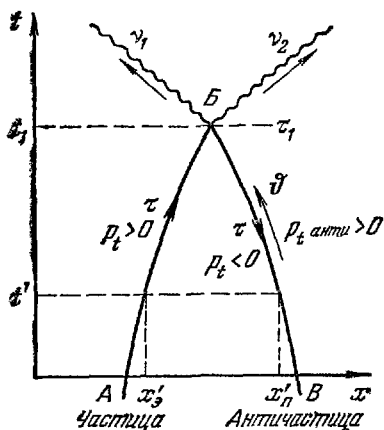


Рис. 3.33

изменением знака любого из них. Но m_{0e} , как уже подчеркивалось, есть инвариант, а вторая возможность, как показывает рассмотренный пример, имеет разумный физический смысл. Такое изменение состояния электрона может произойти в результате столкновения с фотоном (частота до столкновения ν_1 , после столкновения ν_2). Падающий и рассеянный фотоны показаны на графике волнистыми линиями. Процесс этот хорошо известен и носит название эффекта Комптона (см. § 37).

Перейдем теперь к случаю, когда меняет знак временная составляющая четырехмерного импульса $p_t = \frac{E}{c}$. Она также представле-

на произведением двух сомножителей, и Дирак относит изменения знака p_t к первому из них — m_{0e} . Это предположение противоречит теории относительности, согласно которой m_{0e} есть инвариант.

Мы считаем, что изменение знака $p_t = m_{0e} \frac{dc}{d\tau}$ обусловлено изменением знака второго сомножителя, т. е. $\frac{dt}{d\tau}$. Этот путь отвечает духу теории относительности, так как изменения знаков p_x и p_t объясняются одинаково. Как видно из сказанного, других трактовок, кроме дираковской и нашей, быть не может.

На рис. 3.33 представлена мировая линия частицы, у которой в момент собственного времени τ_1 составляющая p_t меняет знак.

На отрезке $A \rightarrow B$, т. е. при $\tau < \tau_1$, энергия частицы, а значит, и p_t , положительны:

$$\text{при } \tau < \tau_1 \quad p_t = \frac{E}{c} = m_{0e} \frac{dct}{d\tau} > 0, \quad \text{т. е. } \frac{dt}{d\tau} > 0. \quad (72.11a)$$

Это значит, что с ростом собственного времени τ «координата» t , т. е. время инерциальной системы отсчета, также растет, достигая при $\tau = \tau_1$ значения $t = t_1$.

В точке B величины p_t , а значит, $\frac{dt}{d\tau}$, меняют знак, становясь отрицательными:

$$\text{при } \tau > \tau_1 \quad p_t = \frac{E}{c} = m_{0e} \frac{dct}{d\tau} < 0, \quad \text{т. е. } \frac{dt}{d\tau} < 0. \quad (72.11b)$$

Это означает, что движение частицы происходит так, что с ростом собственного времени частицы τ время t убывает. На рис. 3.33 это отвечает участку графика $B \rightarrow B$.

В случае изменения знака p_x (рис. 3.32) частица до момента τ_1 двигалась вдоль оси x , а затем попятно.

В случае изменения знака E , т. е. p_t (рис. 3.33), частица двигалась так, что до момента τ_1 с ростом τ росло и t . Начиная с τ_1 росту τ отвечает уменьшение t , т. е. частица начинает двигаться во времени в обратном направлении, попятно, не в будущее, но в прошлое.

Толкование полученной картины связано с одной особенностью. В первом случае (изменение знака p_x) мы могли бы сопутствовать электрону в его движении, двигаясь сначала вдоль оси x , а затем в обратном направлении. Во втором случае «сесть верхом на электрон» уже невозможно — человек лишен возможности двигаться во времени вспять (пока что мы примем это как опытный факт; ниже мы докажем невозможность «машин времени» не только для человека, но даже для простейших систем частиц).

Для частицы последовательность состояний — $A \rightarrow B \rightarrow B$. На первом участке графика $A \rightarrow B$ мы можем изучать события в жизни частицы в той же последовательности. На втором участке мы вынуждены изучать события в жизни частицы с ростом нашего времени t , т. е. в последовательности $B \rightarrow B$ (для частицы эта последовательность событий — перевернутая: росту τ отвечает последовательность $B \rightarrow B$). Результат будет такой же, как и при просмотре кинофильма в обратном направлении. Так, если события состояли в движении электрона между обкладками конденсатора, то нормальная их последовательность — ускорение, направленное от отрицательно заряженной обкладки к положительно заряженной. При просмотре фильма в обратном направлении мы обнаружим, что ускорение имеет обратное направление.

Это отвечает движению частицы, несущей положительный заряд!

Итак, участок мировой линии $A \rightarrow B$ мы интерпретируем как движение электрона, участок $B \rightarrow B$ — как движение позитрона. В любой момент времени $t < t_1$ наблюдаются две частицы.

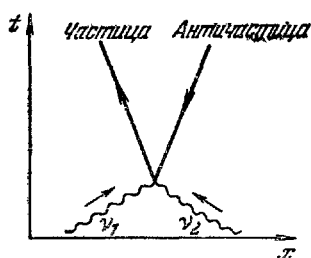


Рис 3.34

Так, в момент $t = t'$ электрон находится в точках x'_e , позитрон — в точке x'_p . Далее с ростом t частицы сближаются, в момент времени $t = t_1$ сталкиваются и при $t > t_1$ уже не наблюдаются: произошла аннигиляция пары электрон — позитрон. В силу законов сохранения такой процесс сопровождается испусканием фотонов, показанных на графике волнистыми линиями.

Позитрон на участке $B \rightarrow B$ имеет положительную энергию. В этом легко убедиться, если ввести собственное время позитрона ϑ , текущее в направлении, обратном собственному времени электрона, так, что $d\vartheta = -dt$. Поскольку $E_e = m_0 c^2 \frac{dt}{d\tau} < 0$, то $E_p = m_0 c^2 \frac{d\vartheta}{d\theta} > 0$.

Обратный процесс — образование пары при столкновении двух фотонов — показан на рис. 3.34. В отличие от дираковской, в нашей интерпретации вакуум есть вакуум — никаких ненаблюдаемых частиц в нем нет. Античастица есть обычная частица, обладающая отрицательной собственной энергией и, следовательно, движущаяся во времени попятно. Мы наблюдаем ее в соответствии с течением нашего времени, интерпретируя как античастицу с положительной энергией и зарядами (электрическим и другими) обратных знаков по сравнению с зарядами частицы. Частицы совершенно равноправны: электрон есть антипозитрон. Наконец, эта интерпретация не связана с запретом Паули и равно применима ко всем без исключения микрочастицам.

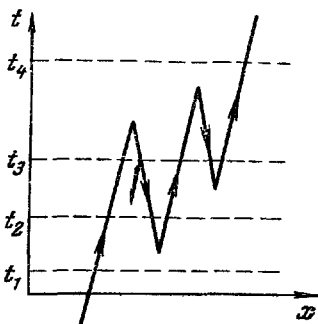


Рис. 3.35.

Рис. 3.35 показывает, что число частиц может меняться, в то время как заряды системы строго сохраняются. Так, если это график электрически заряженной частицы, то при $t = t_1$ имеется одна частица, при $t = t_2$ — две частицы и античастица (суммарный

заряд тот же), при $t=t_3$ — три частицы и две античастицы (опять тот же заряд), при $t=t_4$ — вновь одна частица и т. д. Фотоны, связанные с рождением и аннигиляцией пар, не показаны.

В § 27 было показано, что теория относительности в принципе позволяет путешествие в сколь угодно далекое будущее. Покажем теперь на простом примере, что путешествие в прошлое (для систем!) невозможно. Будем доказывать от противного. Представим себе, что уэлловский «путешественник во времени» существует и мы начинаем наблюдать за ним в 11 часов дня. В 12 часов путешественник отправляется во времени вспять и, следовательно, возвращается опять к 11 часам. Значит, от одиннадцати до двенадцати часов мы должны видеть двух: путешественника и его антипода, нацело состоящего из античастиц. После отправления вспять, т. е. после 12, исчезнут оба. Но что должно произойти в 12 часов?

Постепенно сближаясь, путешественник и его антипод должны к 12 часам точно совместиться один с другим — совершенно точно *каждая частица со своей античастицей*. В 12 часов все без исключения частицы аннигилируют со своими античастицами. Совершенно очевидно, что ни такое совмещение системы с анти-системой, ни одновременная аннигиляция всех пар невозможны. Аннигиляция начнется «раньше чем нужно» — при первом соприкосновении системы и антисистемы. А выделяемая при этом энергия разрушит то, что осталось, ибо у систем энергия связи между частицами на несколько порядков меньше, чем собственная энергия частиц, выделяемая при аннигиляции.

Если микрочастицы состоят из каких-то простейших частиц, то последнее замечание к ним не относится, что и определяет их качественное отличие от обычных систем: энергия связи этих простейших в устойчивой микрочастице должна быть больше (и, по-видимому, намного больше), чем собственная энергия получившейся микрочастицы. Это и позволяет микрочастицам менять направление движения во времени, не рассыпаясь.

Заметим, наконец, что возможность отправляться во времени вспять «не дает микрочастицам никаких преимуществ». Человек, совершив ошибку и убедившись в этом, мог бы вернуться вспять во времени с тем, чтобы эту ошибку не повторить. Но микрочастица «не обладает памятью», на ней не фиксируется никакая информация: ни одна из ее характеристик (масса покоя, заряды, спин) не меняются в результате перенесенных ею испытаний. Микрочастицы не стареют и никакой информации «в памяти» не накапливают. Следовательно, для микрочастиц смысл времени иной, чем для макросистем.

Превращения частиц не исчерпываются рождением и аннигиляцией пар. Иного типа, например, известное уже нам превращение $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$. Эти превращения описаны в следующем параграфе.

§ 73. Превращения микрочастиц

За одним-единственным исключением (второй тип нейтрино), все еще не описанные нами частицы обладают большой массой покоя и неустойчивы. Они рождаются при соударениях частиц высокой энергии. Впервые такие частицы были обнаружены при изучении космических лучей, на природе которых мы коротко остановимся.

Космические лучи представляют собой поток частиц большой энергии (от 10^9 до 10^{18} эв на частицу), приходящих на Землю из космического пространства. Впервые они были обнаружены по вызываемой ими ионизации, а значит, и проводимости сухого воздуха, растущей с подъемом от поверхности Земли. В энергетическом балансе Земли космические лучи никакой роли не играют, так как количество частиц невелико. Интерес представляет их происхождение и те процессы, которые разыгрываются в результате их столкновений с атомами земной атмосферы: в лабораторных условиях еще не достигнут предел в 10^{12} эв на частицу, в то время когда среди космических частиц имеются обладающие в миллион раз большей энергией.

Согласно современным гипотезам исходным источником космических частиц является феномен «сверхновых» (В. Л. Гинзбург и др.) — гигантские взрывы звезд, при которых их светимость в течение нескольких десятков часов возрастает в 10^5 — 10^7 раз, убывая затем до обычного уровня за несколько лет. По-видимому, при таких взрывах звезда выбрасывает огромные количества самых различных частиц — электронов, протонов, ядер различных масс, с энергией до 10^{10} эв. Дальнейшая судьба электронов и тяжелых частиц различна.

В космическом пространстве имеются гигантские облака холодного межзвездного газа, с которым связано слабое магнитное поле. Отклоняясь в этом поле, электроны испускают тормозное излучение (см. т. II, § 53) очень малой частоты — радиоизлучение. На это радиоизлучение и расходуется постепенно энергия электронов. Протоны и тяжелые ядра, обладая большой массой, испытывают в этих же условиях столь малые ускорения, что энергии на тормозное излучение практически не теряют. Как показал впервые Э. Ферми, в результате многочисленных взаимодействий с магнитными полями межзвездной материи эти частицы постепенно ускоряются.