

роятность того, что образующиеся в e^+e^- -аннигиляции кварк или антикварк могут испускать глюон под достаточно большим углом к направлению разлета кварка и антикварка *). Вместо двух струй адронов в этом случае должны наблюдаться три струи адронов. Поэтому согласно квантовой хромодинамике следовало ожидать, что с повышением энергии сталкивающихся электронов и позитронов наряду с двухструйными событиями должно появляться и некоторое количество трехструйных событий. И в 1979 г. такие трехструйные события действительно были обнаружены. Открытие трехструйных событий служило доказательством существования глюонов.

Каждому типу взаимодействия частиц отвечает свой тип зарядов — источников поля соответствующего взаимодействия. Так оказалось возможным единообразно описать такие внешне разные взаимодействия, как электромагнитное, слабое и сильное. Но заряды слабого взаимодействия обладают еще одним специфическим свойством: несохранением пространственной четности.

Четность

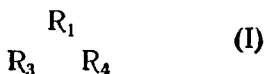
До 1956 г. все опыты, атомные и ядерные, казалось, подтверждали естественное предположение о зеркальной симметрии законов природы. Если и существуют несимметричные предметы, например, «правые» перчатки, то с тем же успехом можно изготовить и перчатку на левую руку. То же относится и к сложным органическим молекулам; великие химики XIX в. установили, что в органических молекулах

типа $\begin{array}{c} R_2 \quad R_1 \\ \diagdown \quad / \\ C \\ / \quad \diagdown \\ R_3 \quad R_4 \end{array}$, где R_1, R_2, R_3, R_4 — разные атомы или

разные группы атомов, эти группы располагаются по углам тетраэдра (пирамиды с треугольным основанием (рис. 22)), в центре которого находится атом углерода С.

*) Глюоны электронейтральны и не имеют взаимодействия с электромагнитными квантами, электронами и позитронами. В e^+e^- -аннигиляции глюоны могут образовываться только после рождения пары кварк — антикварк,

Представим себе тетраэдр, поставленный на плоскость так, что R_1 находится над плоскостью. Остальные 3 группы могут располагаться либо, как показано на рис. 22, I, либо, как показано на рис. 22, II. Этим двум разным расположениям соответствуют 2 разные молекулы (I) и (II). Никакими поворотами их нельзя сделать одинаковыми. Различие не связано с тем, что мы выделили группу R_1 и поместили ее вверх. Мы могли бы поместить вверх группу R_2 . Тогда в первом случае в основании окажутся



а во втором —



В растениях и животных мы находим только одну форму, которую можно записать в виде, изображенном на рис. 23.

Однако химики умеют синтезировать и выделять в чистом виде также и другую форму, соответствующую двум переставленным группам. Легко убедиться, что, рассматривая I в зеркале, мы увидим изображение формы II; отличать одну форму от другой можно по форме кристаллов, которые при выпаривании можно отобрать пинцетом, как это впервые сделал Пастер. Формы можно отличать и по направлению вращения плоскости поляризации света.

Опыты подтверждают точное равенство энергий левых и правых форм, следующее из теории. Этот вывод теории, основывающейся на квантовой механике и учитывающей электромагнитное (кулоновское) взаимодействие, связан с зеркальной симметрией. Взаимная замена левых (L) и правых (R) форм $L \rightleftharpoons R$ не меняет предсказаний теории. В квантовой теории состояние $(L + R)$ зеркально симметрично. При отражении в зеркале его волновая функция пе-

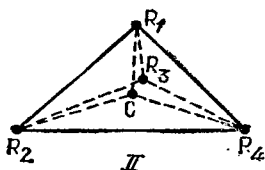
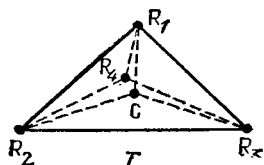


Рис. 22. Органическая молекула имеет форму тетраэдра. Вершины этого тетраэдра — сложные органические соединения R_1 , R_2 , R_3 и R_4 , а центр тетраэдра — атом углерода C

переходит сама в себя со знаком «+»: $P(L+R) \rightarrow +(R+L)$.

Поскольку дважды отразившись в зеркале объект останется самим собой, $P^2 = 1$, $P = \pm 1$ и все состояния

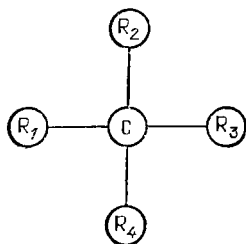


Рис. 23. Сложное органическое соединение, в котором атом углерода С связан с четырьмя соединениями R_1 , R_2 , R_3 и R_4

атомов можно классифицировать по *четности*, они обладают либо $P = +1$, либо $P = -1$. В последнем случае речь идет о более высоколежащих состояниях ($L-R$), волновые функции которых $P(L-R) \rightarrow -(L-R)$.

Когда мы говорим о перчатках на левую и правую руку, или о зеркально симметричных молекулах, мы имеем дело со *статической четностью*.

Если в зеркале отражается процесс, то речь идет о *динамической четности*. Оба аспекта

(статический и динамический) можно проследить на примере штопора (шурупа или винта). Сам штопор обладает либо левой, либо правой винтовой нарезкой. При отражении в зеркале нарезка в штопоре меняется с правой на левую (рис. 24). Это статическая четность. Но ввинчивая штопор в пробку, мы будем совершать либо вращения по часовой стрелке (для правовинтового штопора), либо против часовой стрелки (в случае левовинтового штопора). Динамическая четность характеризует связь направления поступательного и вращательного движения штопора относительно пробки. Если мы ввинчиваем штопор в пробку, поворачивая его по часовой стрелке, то при зеркальном отражении этот процесс будет происходить при поворотах против часовой стрелки. В классическом случае (например, в случае штопора) соответствие динамической и статической четности взаимно однозначное. Это связано с тем, что нарезка в штопоре жестко фиксирована и однозначно определяет

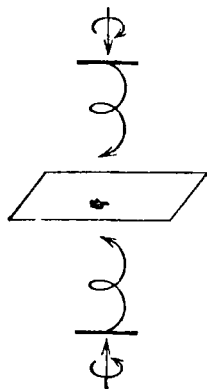


Рис. 24. При отражении в зеркале правовинтового штопора мы получаем левовинтовой штопор

направление вращения при ввинчивании в пробку, а, ввинчивая штопор, по направлению вращения мы однозначно определяем характер нарезки.

Но для элементарных частиц аналогия со штопором, вообще говоря, неправомерна. Электрон, летящий со спином, ориентированным по направлению движения, нельзя рассматривать как штопор с фиксированной нарезкой, поскольку направление движения «штопора» — электрона зависит от выбора системы отсчета. В случае электрона не существует пробки, позволяющей однозначно определить его нарезку. Так, перейдя в систему отсчета, движущуюся быстрее электрона, мы получим изменение характера нарезки «штопора» (рис. 25). Абсолютный характер «нарезки» сохраняется только для безмассовых частиц, скорость которых всегда равна скорости света. Для этих «спиральных» частиц спиральность $sr c/\hbar E$ (где s — спин, а p и E — импульс и энергия частицы) является сохраняющейся и не зависящей от системы отсчета характеристикой.

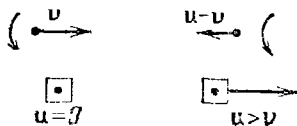


Рис. 25. Поскольку электрон обладает ненулевой массой, его скорость всегда меньше, чем скорость света c , в принципе, его можно обогнать, т. е. может существовать наблюдатель, движущийся быстрее, чем электрон. Тогда, если для покоящегося наблюдателя направление вектора спина совпадает с направлением движения электрона и электрон выглядит как правовинтовой, то для наблюдателя, скорость которого u превышает скорость движения электрона v , вектор спина направлен в сторону, противоположную направлению движения электрона, и электрон выглядит как левовинтовой.

Так, у фотона можно рассматривать как элементарные не две плоские, а две круговые поляризации. При переходе к другой системе отсчета лево- (L) и право- (R) поляризованные фотоны сохраняют свою круговую поляризацию. Это связано с тем, что масса фотона равна нулю, и скорость распространения света равна c . Поэтому можно говорить о разных частицах: L - и R -фотонах, причем различие между L - и R -фотонами не зависит от выбора системы отсчета.

Зеркальная симметрия электромагнитных процессов ведет, однако, к испусканию смешанных L и R и к переходу $L \leftrightarrow R$ фотонов при их отражении в зеркале (при рассеянии) без «порчи» зеркала (электронов).

При высокой энергии существуют правые и левые электроны, но вследствие наличия массы такое деление не абсолютно. Чем ближе скорость частицы к скорости света, тем более точной становится для них аналогия со штопором и более строго можно говорить об их «нарезке». Сохранение четности (динамической) в электромагнитном взаимодействии означает, что «лево»- и «правовинтовые» электроны взаимодействуют одинаково, независимо от характера «нарезки».

При отсутствии массы разделение на правые и левые частицы со спином $1/2$ строгое. Самое строгое разделение достигается уничтожением того, от чего хотят отделиться. Предположим, — не для электронов, а для нейтрино — что существует только один сорт нейтрино с $spc/\hbar = -E$, тогда масса их тождественно равна нулю. Они должны двигаться со скоростью c , чтобы не превратиться в нечто несуществующее. При этом абсолютное разделение левого и правого нейтрино обеспечивается нулевой массой нейтрино.

Нейтрино и антинейтрино *электронейтральны*, и тем не менее отличаются друг от друга *). Значит, «заряд» нейтрино, а также отличие «зарядов» нейтрино и антинейтрино — это не электрическое явление, а нечто похожее на различия нейтрона и антинейтрона. Такие «заряды» нейтрино и антинейтрино можно отличить экспериментально, о чем мы еще расскажем.

Несохранение четности

К середине 50-х гг. накопились серьезные трудности в теории распада К-мезонов. Такие распады происходят за счет слабого взаимодействия, и в 1956 г., обсуждая возможность решения этих трудностей, Т. Ли и Ч. Янг поставили вопрос о сохранении четности в процессах слабого взаимодействия. Они показали, что убедительных экспериментальных данных в пользу эквивалентности правого и левого в процессах слабого взаимодействия нет, что процесс слабого взаимодействия и тот же процесс, отра-

*) Заряженная частица с массой, равной нулю, задала бы хлопот! Она рождалась бы парами в сколь угодно слабом электрическом поле E с вероятностью $\sim (e^2/\hbar c)^2 E^2/\hbar^4 c^3$ штук/(см³·с). При напряженности поля $E = 1$ СГСЕ = 300 В/см это дает чудовищное значение 10^{72} штук/(см³·с). В таких условиях электротехника не могла бы существовать.