

А. А. СОКОЛОВ

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

(Расширенная публичная лекция,
прочитанная в лектории МГУ
10 января 1962 г.)

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
1 9 6 3

СОДЕРЖАНИЕ

§ 1. Введение	3
§ 2. Предсказание Дираком позитрона и его экспериментальное обнаружение	5
§ 3. Нуклоны и пи-мезоны (кванты ядерного поля)	18
§ 4. Бета-распад и открытие нейтрино	28
§ 5. Проблема несохранения четности	32
§ 6. «Подкидыши», «странные частицы» и «резонаны»	49
Литература ,	68

*Печатается по постановлению
Редакционно-издательского совета
Московского университета*

§ 1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной физики идет под флагом атомизма. Как известно, наименьшая частица химического элемента называется атомом, что в переводе с греческого означает неделимый. Дальнейшие исследования показали сложность атома, который состоит из еще более мелких, так называемых элементарных частиц.

Первоначально в термин *элементарность* (так же, как в свое время и в термин *атом*) вкладывалось понятие неделимости. Однако в настоящее время ученые вплотную подошли к изучению структуры элементарных частиц, и поэтому теперь эта неделимость стала пониматься до некоторой степени условно.

При изучении атома основную роль играют четыре элементарные частицы: протон (p), нейтрон (n), электрон (e) и фотон (γ). Согласно теории Иваненко и Гейзенберга, протоны и нейтроны образуют ядро, представляющее собой наиболее плотную часть атома (рис. 1).

Вокруг ядра вращаются электроны, удерживающиеся в атоме благодаря кулоновскому притяжению к ядру (планетарная модель атома по Резерфорду).

Фотоны образуются в атоме при переходе электронов с более высокого энергетического уровня на более низкий. При обратном переходе происходит поглощение фотонов атомом.

Рассмотрим прежде всего эти четыре элементарные частицы.

Основными их характеристиками являются масса покоя, заряд и спин. Последний описывает как бы вращение частицы, т. е. ее внутренние свойства.

За единицы массы покоя и заряда в атомной физике выбираются масса покоя электрона $m_0=0,9 \cdot 10^{-27}$ г и элементарный заряд $e_0=4,8 \cdot 10^{-10}$ абс. электр. ед. Спин измеряется, как правило, в единицах \hbar .

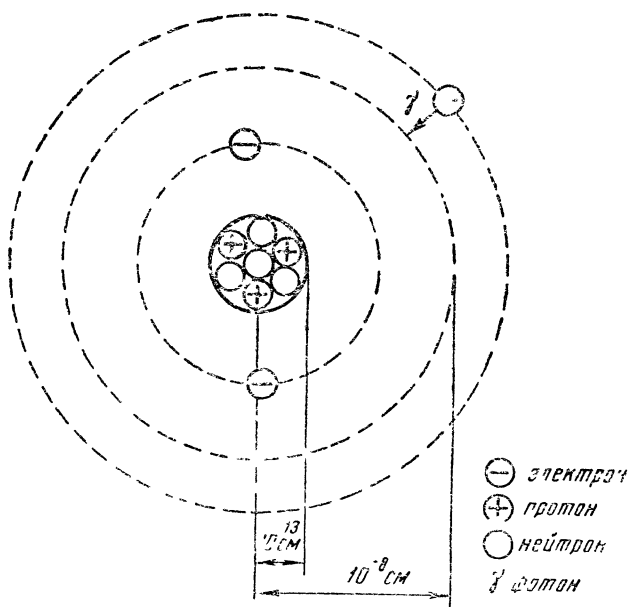


Рис. 1. Планетарная модель атома

Тогда

$$\begin{aligned} \text{для электрона} \quad m_e &= m_0; & e_e &= -e_0; & s_e &= \frac{1}{2}; \\ \text{для протона} \quad m_p &= 1836 m_0; & e_p &= e_0; & s_p &= \frac{1}{2}; \\ \text{для нейтрона} \quad m_n &= 1838,6 m_0; & e_n &= 0; & s_n &= \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

Поскольку электрон является заряженной частицей, то наличие спина s (т. е. собственного момента количества движения) приводит к появлению магнитного момента электрона, проекция которого на направление

спина имеет отрицательный знак, поскольку

$$e_e = -e_0 < 0,$$

$$\mu_e = -\mu_0 = -\frac{e_0}{2m_0c} \hbar,$$

где μ_0 — магнетон Бора, а постоянная Планка

$$\hbar = 2\pi\hbar = 6,62 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{сек.}$$

Магнитным моментом обладают также протон и нейтрон, но об этом ниже.

Несколько слов скажем о фотоне. Долгое время считали, что свет представляет собой электромагнитные волны и что электроны являются корпускулами, т. е. частицами.

Затем были обнаружены у света еще и корпускулярные свойства (согласно теории фотонов Эйнштейна энергия кванта света частоты ν равна $\epsilon = h\nu$), которые проявляются, например, при испускании фотонов, а у электронов — волновые (волна де-Бройля $\lambda = \frac{h}{m_0v}$), которые можно обнаружить, в частности, при прохождении пучка электронов со скоростью v сквозь кристалл (дифракция электронов). В настоящее время хорошо разработана особая наука, получившая название *электронная оптика*, которая лежит в основе расчетов при постройке электронного микроскопа.

Фотоны отличаются от электронов прежде всего отсутствием массы покоя ($m_\nu = 0$) и значением спина (спин фотона равен единице).

Остановимся далее на предсказании и открытии новых элементарных частиц.

§ 2. ПРЕДСКАЗАНИЕ ДИРАКОМ ПОЗИТРОНА И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ

Как известно, Дирак нашел волновое уравнение, учитывающее не только релятивистские, но и спиновые эффекты.

Открытие Дирака имеет для науки столь же важное значение, как открытие трех основных законов механики и закона всемирного тяготения Ньютона, основных уравнений электромагнитного поля Максвелла или теории относительности Эйнштейна.

Полуклассическая теория Бора и даже волновое уравнение Шредингера явились лишь предварительными теориями, которые можно рассматривать как некоторый промежуточный этап на пути к созданию теории Дирака.

С помощью волнового уравнения Дирака удалось впервые дать правильное объяснение тонкой структуры спектральных линий водородоподобного атома, а также построить теорию расщепления спектральных линий, излучаемых атомом, помещенным в магнитное поле (аномальный и нормальный эффекты Зеемана).

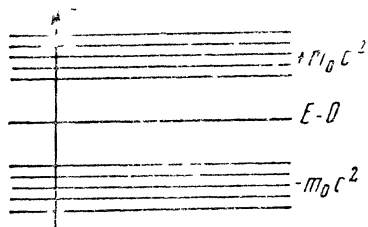


Рис 2. Схема возможных уровней энергии свободной дираковской частицы

В то же самое время на первый взгляд может показаться, что теория Дирака приводит к трудностям, связанным с интерпретацией отрицательных энергий, которые могли казаться даже неустранимыми. В действительности же более подробный их анализ привел к новым фундаментальным открытиям, лежащим

в основе всей современной теории элементарных частиц.

В самом деле, в релятивистской механике энергия E свободной частицы связана с ее импульсом p и массой покоя m_0 соотношением

$$E^2 = c^2 p^2 + m_0^2 c^4,$$

где c — скорость света. Это соотношение допускает два равноправных решения:

$$E = \pm |E|, \quad |E| = \sqrt{c^2 p^2 + m_0^2 c^4},$$

одно из которых соответствует положительной энергии, а другое — отрицательной. Состояния с отрицательной энергией могут показаться нереальными, поскольку область отрицательных энергий простирается до бесконечности ($E \rightarrow -\infty$), благодаря чему не должно существовать устойчивого наинизшего энергетического состояния (рис. 2).

В классической физике при движении частицы ее

энергия может изменяться только непрерывно и поэтому совершенно недопустимы переходы из состояний с положительной энергией ($E > m_0c^2$) в состояния с отрицательной энергией ($E < -m_0c^2$), когда энергия меняется скачком ($\Delta E \geq 2m_0c^2$). Таким образом, исключив в начальный момент времени состояния с отрицательной энергией, мы можем их в дальнейшем вообще не вводить, т. е. там отрицательная энергия трудностей не представляет.

Совершенно иное положение вещей мы имеем в квантовой теории, где вполне допустимы переходы также и с дискретным изменением энергии. Тогда состояния с отрицательной энергией не могут быть механически исключены, так как вероятность перехода между уровнями с энергией $+m_0c^2$ и $-m_0c^2$ будет отличной от нуля.

После появления релятивистской теории Дирака (1928) вначале никто не акцентировал внимания на этой трудности. Большинство авторов предлагали состояния с отрицательной энергией, как и в классической теории, просто отбрасывать. Поскольку это отбрасывание в квантовой теории математически не было строго обосновано, наличие состояний с отрицательной энергией известно было под названием «плюс минус трудность».

В течение ряда лет этот вопрос оставался открытым и только в 1931 г. сам Дирак нашел весьма оригинальное его решение. Он предположил, что все состояния с отрицательной энергией заполнены электронами. Поэтому в соответствии с принципом Паули, согласно которому в каждом квантовом состоянии не может быть более одного электрона, электроны с положительной энергией не могут переходить на эти занятые состояния.

Согласно Дираку, пустое пространство должно представлять собой в действительности некое «море» (вакуум) электронов, которые целиком заполняют состояния с отрицательной энергией, в то время как все состояния с положительной энергией остаются свободными (рис. 3).

Допустим теперь, что гамма-квант с энергией более $2m_0c^2$, действуя на электрон вакуума, переведет его в состояние с положительной энергией (рис. 4).

В этом случае вместо поглощенного гамма-кванта появляется электрон с положительной энергией и одновременно «дырка» на фоне «моря» электронов с отри-

цательной энергией, обладающих отрицательной инертной массой

$$m = -\frac{|E|}{c^2} < 0.$$

Поскольку ускорение частицы равно отношению силы к массе, то частицы с отрицательной массой будут двигаться против действия сил.

Что касается «дырки», то ее движение должно напоминать собой движение пузырька в море.

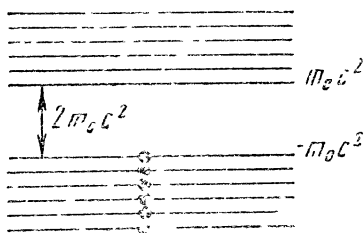


Рис. 3 Схема нулевого состояния электронно-позитронного вакуума



Рис. 4 Схема образования пары электрон — позитрон

Как известно, пузырек в море под действием тяготения будет двигаться вверх, т. е. против движения самой воды. Если бы вода обладала отрицательной массой, то под действием силы тяжести (если гравитационная масса остается при этом положительной) она двигалась бы вверх, поэтому пузырек в море стал бы падать на землю как частица с положительной массой.

Нулевой заряд вакуума (т. е. состояний с отрицательной энергией) при появлении «дырки» несколько увеличивается, так как в вакууме в этом случае не будет доставать одного электрона, заряженного отрицательно. Поэтому «дырка» на фоне «моря» электронов с отрицательной энергией будет вести себя не только как частица с положительной массой, равной массе электрона, но и как частица с положительным зарядом. Эта частица получила название *позитрон*

Последняя теория допускает и обратный процесс, а именно — при наличии позитрона (т. е. «дырки» на фоне

отрицательных уровней) электрон с положительной энергией может перейти в эту «дырку», испуская при этом гамма-кванты, частота которых может быть найдена из закона сохранения энергии (рис. 4).

В полном согласии с предсказанием Дирака, позитрон был открыт Андерсенем в конце 1932 г. Точно так же экспериментально было доказано превращение электрона и позитрона в гамма-кванты. Этот процесс получил название *аннигиляции*, что в буквальном переводе означает уничтожение.

На самом же деле при этом происходит не уничтожение частиц, а их превращение в другие частицы.

С этого момента начинается новая эпоха развития теории элементарных частиц, учитывающая возможность их взаимных превращений.

Со многими первостепенными открытиями бывают часто связаны легендарные истории о том, как они произошли. Например, хорошо известна легенда, что закон всемирного тяготения Ньютон открыл, якобы анализируя падение яблока на землю.

В Кембридже (Англия) популярна легенда о том, как Дираку пришла в голову мысль интерпретировать «дырки» на фоне отрицательных энергий как позитроны. Дирак охотно участвовал в конкурсе задач, организуемом Кембриджским студенческим математическим обществом. Одна из задач была следующей. Трое рыбаков наловили рыбу и остались на берегу ночевать. Один из рыбаков проснулся и решил уйти, забрав свою долю улова. Он обнаружил, что сможет разделить добычу на три части, если выбросит одну рыбу в море. Так он и сделал, и забрав с собой треть улова, ушел домой. Вскоре проснулся второй рыбак, который, не подозревая, что ушел первый, снова начал делить улов. Как и первый рыбак, он разделил всю рыбу на три части и также обнаружил, что одна рыба остается лишней. Выбросив ее, он забрал свою треть улова и ушел. Точно такую же операцию проделал и третий рыбак, обнаружив при делении оставшегося улова на три части опять одну лишнюю рыбу. Требовалось определить, сколько было рыб первоначально, указав при этом допустимое минимальное число.

Если произвести вычисление тривиальным путем, то

в ответе получится 25 рыб. Однако Дирак предложил другой ответ, а именно минус два (-2). В самом деле, если выбросить при этом одну рыбу, то остается минус три рыбы, которые можно разделить на три части и для следующего рыбака опять останется минус две рыбы и так далее.

Как говорит легенда, дальнейшие размышления Дирака над этим, казалось бы, совершенно парадоксальным результатом и привели его к величайшему открытию современности.

Следует заметить, что электрон и позитрон могут образовывать также и атомоподобную систему типа атома водорода, у которой протон заменен позитроном. Это соединение получило название позитрония. Время жизни атома позитрония сильно зависит от значения общего спина системы, поскольку при аннигиляции, т. е. взаимном превращении частиц, должны соблюдаться законы сохранения импульса и спина.

Парапозитроний (спины электрона и позитрона антипараллельны) может превратиться в два гамма-кванта, которые должны разлетаться в противоположных направлениях с противоположно направленными спинами (общий импульс и общий спин гамма-квантов также будут равны нулю). Время жизни парапозитрония равно $1,25 \cdot 10^{-10}$ сек.

Спин ортопозитрония равен единице. Он не может (так же как и парапозитроний) распадаться на один гамма-квант, так как в этом случае будет нарушен закон сохранения импульса. При распаде ортопозитрония на два гамма-кванта не будет выполнен закон сохранения спина, поскольку для двух гамма-квантов он равен либо двум, либо нулю. Только при его распаде на три гамма-кванта можно удовлетворить одновременно законам сохранения и импульса и спина. Поэтому вероятность распада ортопозитрония сильно уменьшается, а время его жизни увеличивается и становится равным $1,4 \cdot 10^{-7}$ сек. Орто- и парапозитроний уже открыты экспериментально и находят большое применение при исследованиях во многих областях физики, включая даже конденсированные среды.

Следует заметить, что современная теория вакуума гораздо сложнее, чем ее первоначальный вариант, предложенный Дираком.

Например, полная теория должна быть симметричной относительно замены электронов на позитроны. Поэтому, сделав расчет (исходя из того положения, что электрон — частица, а позитрон — «дырка»), мы должны его повторить, предполагая теперь, что позитрон — частица, а электрон — «дырка». Тогда истинный результат должен равняться среднему арифметическому этих двух расчетов. В частности, отсюда следует, что заряд вакуума обращается в нуль.

Теория электронно-позитронного вакуума позволила рассчитать превращение гамма-кванта в пару электрон и позитрон и обратно. Чтобы при обратном превращении строго соблюдались законы сохранения энергии и импульса, число гамма-квантов должно быть не менее двух.

Образование пары происходит, как правило, при поглощении гамма-кванта ядром, которое и берет на себя часть импульса.

Кроме того, теория электронно-позитронного вакуума позволила по-новому подойти к вопросу о структуре элементарных частиц. Как известно, еще Лоренц указал на тесную связь электрона с электромагнитным полем, им порождаемым. Точнее, он считал, что вся масса электрона определяется энергией U этого электромагнитного поля:

$$m^{\text{эл}} = \frac{U}{c^2} = \frac{be_0^2}{c^2 r_0},$$

где c — скорость света, а b — коэффициент порядка единицы, зависящий от распределения заряда внутри электрона, представляющего собой шарик радиуса r_0 .

Вначале в пользу теории электромагнитной массы, по Лоренцу, говорил закон ее изменения со скоростью v :

$$m^{\text{эл}} = m_0 / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

поскольку считалось, что неполевая масса не должна изменяться со скоростью.

Однако после появления теории относительности, из которой следует, что неполевая масса должна изменяться со скоростью по тому же закону, как и электромагнитная, этот аргумент в пользу электромагнитной

массы отпал полностью. Других каких-либо структурных особенностей строения электрона теория электромагнитной массы не объяснила, а лишь привела к ряду противоречивых выводов.

В симметричной относительно электронов и позитронов теории вакуума эта электромагнитная масса обращается в нуль (в самом деле, рассматривая электрон как частицу, мы получим положительное значение для электромагнитной массы, а рассматривая его как «дырку» — отрицательное).

Однако сам вакуум напоминает собой до некоторой степени диэлектрик и поэтому любой заряд может его поляризовать, что, в свою очередь, должно сказаться на свойствах электрона. По теории вакуума основная часть массы электрона, так называемая затравочная масса ($m^{\text{затр}}$), должна носить неполевой характер. Благодаря взаимодействию с вакуумом получается лишь дополнительная масса, дающая небольшой добавок:

$$\Delta m^{\text{вак}} \sim \frac{1}{137} m^{\text{затр}},$$

где $\frac{1}{137} = \frac{e^2_0}{c\hbar}$ — постоянная тонкой структуры. Поэтому общая, т. е. наблюдаемая экспериментально, масса электрона будет равна сумме этих масс:

$$m_0 = m^{\text{затр}} + \frac{b}{137} m^{\text{затр}},$$

где b — коэффициент порядка единицы.

Точно так же взаимодействие электрона с электронно-позитронным вакуумом приводит к уменьшению затравочного заряда и поэтому наблюдаемый заряд становится равным

$$e = e^{\text{затр}} \left(1 - \frac{b_1}{137} \right) = -e_0.$$

До настоящего момента никто еще не наблюдал по отдельности затравочную и полевую часть заряда.

Тем не менее эти выводы привели к объяснению ряда фактов, хорошо изученных экспериментально.

Остановимся прежде всего на лэмбовском сдвиге энергетических уровней в атоме. Согласно теории Дирака, в атоме водорода уровни $2s_{1/2}$ (главное квантовое число $n=2$, орбитальное $l=0$, внутреннее $j=1/2$) и

$$2p_{1/2} \left(n = 2, \quad l = 1, \quad j = \frac{1}{2} \right)$$

должны быть слившимися. Однако эксперимент Лэмба показал, что уровень $2s_{1/2}$ должен быть сдвинут вверх относительно уровня $2p$ на величину $1058 \text{ Мгц} = 1058 \cdot 10^6 \text{ 1/сек}^*$. Хотя это расщепление очень мало и в длинах волн соответствует

$$\Delta\lambda = \frac{c}{1058 \cdot 10^6} \approx 28 \text{ см},$$

но оно имеет принципиальное значение, так как доказывает существование поляризации вакуума.

Весьма наглядную картину для объяснения сдвига уровней дал Вельтон. Движение электрона, по его теории, должно напоминать собой движение броуновской частицы. Как известно, движение броуновской частицы вызвано ударами хаотически движущихся молекул окружающей среды.

Точно так же на движение элементарной частицы оказывают влияние своеобразные «удары» множества виртуальных фотонов, электронов и позитронов, образующих вакуум. Это приводит к тому, что электрон должен начать совершать хаотические движения в объеме с радиусом, равным среднему геометрическому от радиуса электрона $r_0 = e_0^2/m_0c$ и комптоновской длины волны

$$\lambda_0 = \frac{h}{m_0c},$$

$$R = \sqrt{r_0\lambda_0} \approx 10^{-12} \text{ см}.$$

* Особенно сильное воздействие вакуума только на s -уровни можно объяснить следующим образом: основную роль как в электромагнитном, так и в электронно-позитронном вакууме играет так называемое контактное взаимодействие, которое, будучи пропорционально δ -функции, проявляется лишь при непосредственном соприкосновении электрона и протона. Поскольку только для s -уровней волновая функция отлична от нуля в центре ядра, то они и должны испытывать наибольший сдвиг.

Поэтому хотя «затравочные» размеры электрона остаются пока неизвестными (точнее «голый» электрон принимается за точечный), он одет в электронно-позитронную «шубу» с размерами порядка $R \approx 10^{-12}$ см, причем взаимодействие между «голым» электроном и этой «шубой» переносится электромагнитным полем. Развивая эти идеи, можно вообще попытаться объяснить статистический характер волновой механики как результат взаимодействия электрона с вакуумом. Как известно, волновая теория может лишь с определенной вероятностью, определяемой соотношением неопределенности, предсказать координату и импульс частицы (статистическая интерпретация Борна). Это означает, что при одновременном наличии многих частиц, находящихся в одинаковом состоянии, или при многократном повторении одинаковых состояний с отдельными частицами, указанный разброс дает типичную волновую картину для распределения числа частиц, например, при их дифракции (квантовые ансамбли Блохинцева — Никольского).

Копенгагенская школа (Бор, Гейзенберг и др.) связывает этот разброс с неконтролируемым воздействием макроскопического наблюдателя на микроскопический объект (например, на электрон), т. е. тем самым в науку о микромире вводятся элементы позитивизма*.

* Из квантовой механики строго следует соотношение неопределенности. Оно определяет точность, с которой можно теоретически предсказать координату и импульс частицы. В основу физического обоснования соотношения неопределенности Бор и Гейзенберг пытаются положить принцип дополнительности (копенгагенская интерпретация квантовой механики), введение которого является вовсе не обязательным и, более того, вызывает большие дискуссии.

Бессспорно, Бор и Гейзенберг в развитии квантовой теории сделали очень и очень многое. Однако это не означает, что и всю их методологическую концепцию, в том числе и принцип дополнительности, следует принимать полностью.

Согласно принципу дополнительности должны существовать два класса экспериментальных установок. Один допускает измерения с любой точностью пространственных координат, а другой — соответствующих составляющих импульса. Поскольку при использовании первого класса установок последние вносят воздействие на импульс, которое не может быть сделано меньше некоторого предела, а при использовании второго класса — на координату, то, по мнению представителей копенгагенской школы, должен существовать некий конечный предел нашего познания микромира. Это положение

Однако, вопреки этой точке зрения, у нас и за рубежом делаются различные попытки (иногда не совсем удачные) найти объяснение статистического характера движения электрона без учета воздействия на него макроскопических наблюдателей

Заметим, что наблюдатели с помощью приборов могут создать лишь условия конкретного проявления волновых свойств частиц, например дифракцию квантового ансамбля

Нам кажется, что путь к решению этого сложного вопроса должен лежать в построении такой теории, где при движении электрона учитывались бы флуктуационные удары со стороны фотонов или других вакуумных частиц.

В частности, нами совместно с И. М. Терновым было показано, что электрон, движущийся в магнитном поле (например, в синхротроне с энергией порядка 1 БэВ), должен начать интенсивно излучать кванты света большой энергии, которые в конце концов должны привести к квантовому возбуждению бетатронных колебаний с макроскопической амплитудой, образуя тем самым своеобразный квантовый «макроатом», что и было обнаружено в весьма прецизионных опытах Ф. А. Коротева с сотрудниками.

возводится даже в особый принцип, утрируя который, можно сказать, что с исчезновением приборов должны якобы исчезнуть и волновые закономерности микромира

Вообще же принцип дополнительности, который скорее определяет не физические закономерности, а наше мировоззрение, фактически может найти применение лишь для объяснения некоторого ограниченного круга явлений микромира. Например, исходя из принципа дополнительности был сделан совершенно правильный вывод о том, что статистические закономерности квантовой механики не должны сводиться к динамическим

Что касается интерпретации корпускулярно-волнового дуализма как результата якобы принципиальной неконтролируемости взаимодействия между микрообъектом (например, электронами) и макроприбором (например, дифракционной решеткой), то этот вопрос в действительности оставался непознаваемым, покрытым маской таинственности, пока исследования ученых ограничивались рамками атомных явлений

В дальнейшем весьма интересные опыты по дифракции поочередно летящих частиц (Вавилов, Фабрикант, Яноши и др) показали, что хотя теоретически пока возможно предсказать координату и импульс частицы лишь в пределах соотношений неопределенности, экспериментально их можно определить значительно точнее, правда, для прошедшего момента времени. В самом деле, попадание

В данном примере электроны должны начать двигаться по законам квантовой теории благодаря флуктуационному взаимодействию с реально излучаемыми фотонами. В настоящее время в лаборатории во Фраскати (близ Рима) построены не только электронный синхротрон с энергией свыше 1 Бэв, но и первые накопители электронов и позитронов с энергией порядка 300 Мэв; эти частицы, двигаясь в магнитном поле по круговым траекториям, могут удерживаться около двух суток. В этих накопителях уже наблюдалось излучение отдельных электронов, что дает возможность проследить переход от движения по классическим законам к движению по квантовым.

Далее, нами совместно с В. С. Тумановым было показано, что если в классическом нерелятивистском уравнении движения электрона Дирака, где учитывается сила радиационного трения Планка (конкретно это было сделано для гармонического осциллятора), учесть еще флуктуации со стороны электромагнитного вакуума (виртуальные фотоны), то мы автоматически получаем соотношение неопределенности для теоретически пред-

отдельной частицы на экран вместо теоретически предсказываемой дифракционной картины дает изображение точки. Более того, появились экспериментальные данные, относящиеся к структуре нуклона, уточняющие не только его корпускулярные свойства, но и взаимодействие с вакуумом пи-мезонов (см. ниже).

Поэтому воздвигаемый принципом дополненности некий неизбежный предел познаваемости микромира ведет к позитивизму и не может способствовать в настоящее время дальнейшему развитию науки о микромире. В связи с этим напомним, что и механистическое мировоззрение, на некотором раннем этапе развития классической физики сыгравшее известную положительную роль, при возведении его в абсолют в конце концов стало мешать развитию физики.

Как мы уже отмечали, оставаясь в рамках квантовой механики, в основу понимания волновых свойств частиц более разумно положить квантовые ансамбли. Последние, хотя и не дают объяснения статистического характера квантовой механики, но рассматривают это (пусть пока что даже формально) как проявление каких-то объективных закономерностей природы и не запрещают вводить для объяснения статистического характера различные гипотезы, выходящие за рамки существующей квантовой механики. Само собой разумеется, что при этом квантовую механику следует рассматривать как последующий и более совершенный этап развития учения об элементарных частицах, который безусловно не является последним, поскольку согласно ленинской теории отражения наше познание природы должно идти по линии асимптотического приближения к истине.

сказываемого совместного разброса координаты и импульса. По этой гипотезе движение электрона вообще должно напоминать собой движение броуновской частицы, когда теория может предсказать лишь вероятность той или другой траектории, поскольку движение электрона в целом связано с вакуумными флуктуациями.

Таким образом, в классической теории можно выбрать некоторую замкнутую систему, содержащую конечное число материальных точек (или конечное число степеней свободы), для которых хотя бы в принципе допустимо сформулировать точные классические уравнения движения (динамическая, или лапласовская, закономерность), и отождествить причинность с однозначной предсказуемостью. В квантовой теории поля это сделать уже невозможно, поскольку даже один электрон будет содержать с учетом флуктуационных ударов со стороны вакуума бесконечное число степеней свободы.

Иными словами, если в классической теории на базе поведения отдельных частиц изучают движение их совокупности (классическая статистическая физика), то в квантовой механике, наоборот, на базе статистических закономерностей пытаются судить о движении отдельной частицы.

Остановимся далее на вакуумной добавке к магнитному моменту электрона. Особенно ярко влияние электронно-позитронного вакуума вырисовывается при определении общего магнитного момента электрона. С учетом электронно-позитронного вакуума наблюдаемый магнитный момент электрона должен быть равен

$$\mu^{\text{эл}} = -\mu_0 \left(1 + \frac{1}{137} \cdot \frac{1}{2\pi} \right) = -\mu_0 (1 + 0,00116).$$

Второй член в скобках, пропорциональный коэффициенту 0,00116, почти в тысячу раз меньше основного и определяет вакуумную добавку к магнитному моменту электрона, обусловленную электронно-позитронной «шубой». В полном количественном согласии с теорией эта поправка была наблюдаема экспериментально в классических опытах Куша и Фолли.

Анализ выражения для магнитного момента интересен еще и в том отношении, что с его помощью можно не только теоретически, но и экспериментально уста-

новить долю участия электронно-позитронного вакуума, а главное рассматривать элементарные частицы не «голыми», а одетыми в вакуумные «шубы».

§ 3. НУКЛОНЫ И ПИ-МЕЗОНЫ (кванты ядерного поля)

Энергия связи нуклонов (т. е. протонов и нейтронов) в ядре обязана в основном специфическим ядерным силам, которые носят короткодействующий характер, т. е. на ядерных расстояниях порядка 10^{-13} см они в тысячу раз превышают кулоновские силы, а на больших расстояниях практически обращаются в нуль. В этом отношении ядерные силы напоминают собой силы сцепления, удерживающие каплю жидкости в шарообразном состоянии. Долгое время вопрос о ядерных силах оставался открытым.

Наконец, Юкава в 1935 г. предположил, что существуют кванты ядерного поля (сам Юкава их назвал *и*-частицами, впоследствии ими оказались пи-мезоны).

Если масса покоя свободных бесспиновых частиц отлична от нуля, то соответствующее волновое уравнение должно иметь вид:

$$(E^2 - c^2 p^2 - m^2 c^4) \varphi = 0, \quad (1)$$

где $E = -\frac{\hbar}{i} \cdot \frac{\partial}{\partial t}$ и $\vec{p} = \frac{\hbar}{i} \vec{\nabla}$ — операторы энергии и импульса. Отсюда, в частности, в статистическом случае, когда функция φ не зависит от времени, получаем уравнение Юкава для ядерного потенциала:

$$(\nabla^2 - k_0^2) \varphi = 0, \quad m = \frac{\hbar k_0}{c} = 0.$$

Если массу частиц, сопоставленных полю, положить равной нулю, получим обычное уравнение Пуассона для электростатического поля $\nabla^2 \varphi = 0$, которое приводит к следующему выражению для энергии взаимодействия между протоном и электроном:

$$V = -\frac{e_0^2}{r}.$$

Решение уравнения Юкава с отличной от нуля массой покоя (для пи-мезонов) дает для энергии взаимодействия двух нуклонов выражение

$$V = -g^2 \frac{e^{-k_0 r}}{r}. \quad (2)$$

Выбирая g^2 порядка $1000 e_0^2$, мы найдем, что на малых расстояниях

$$r \ll \frac{1}{k_0} = \frac{\hbar}{mc}$$

ядерные силы будут более чем в тысячу раз превышать электромагнитные.

На расстояниях, превышающих значение \hbar/mc , ядерные силы благодаря наличию экспоненциального множителя практически обращаются в нуль.

Зная область действия ядерных сил, можно определить величину \hbar/mc , а вместе с тем и массу пи-мезонов. В настоящее время открыты как заряженные пи-мезоны (π^\pm -мезоны с массой $273 m_0$), так и нейтральные (π^0 -мезоны с массой $264 m_0$).

Существование их предсказал Юкава в 1935 г., а экспериментально они были обнаружены лишь в 1947 г. английским физиком Пауэллом.

Согласно современной квантовой теории поля взаимодействие между двумя элементарными частицами возникает благодаря обмену третьими частицами.

Не останавливаясь на деталях этой теории, мы все же укажем, что электростатическое взаимодействие обусловливается испусканием и поглощением зарядами так называемых псевдофотонов, представляющих собой кванты продольного электромагнитного поля. Точно также ядерные силы по теории Юкава возникают в результате того, что два нуклона обмениваются друг с другом пи-мезонами.

Этот обмен и связывает нуклоны между собой в ядре, заставляя их крепко держаться друг друга, как это обычно и бывает при любом взаимовыгодном обмене.

Следует заметить, что теория ядерных сил развита значительно хуже, чем теория электромагнитных сил. Точный вид взаимодействия между протоном и нейтроном еще неизвестен. Однако существование мезонной

«шубы» уже обнаружено экспериментально при изучении рассеяния нуклонами быстрых заряженных частиц (электронов, пи-мезонов).

Энергия, как правило, измеряется в электроновольтах (1 эв равняется энергии, которую получает электрон, пройдя разность потенциалов в один вольт), мегаэлектронвольтах ($1 \text{ Мэв} = 10^6 \text{ эв}$) и в биллиэлектронвольтах ($1 \text{ Бэв} = 10^9 \text{ эв}$). Так, например, энергия связи электрона в атоме водорода равняется 13 эв . Энергия в несколько электроновольт удерживает атомы в молекуле.

Собственная энергия электрона m_0c^2 равна примерно $0,5 \text{ Мэв}$, так что при аннигиляции электрона и позитрона выделяется в виде гамма-излучения энергия, превышающая 1 Мэв . Альфа-частицы, которые вылетают из радиоактивных ядер урана, имеют энергию порядка 7 Мэв . Эти частицы и были использованы Резерфордом для простреливания атома при установлении планетарной модели.

Наконец, чтобы прострелить нуклон, нужно взять частицы с еще большей энергией, порядка сотен мегаэлектронвольт, или нескольких биллиэлектронвольт. Частицы со столь большими энергиями имеются, например, в космических лучах (энергия в среднем равна 10 Бэв). Однако их число сравнительно невелико. Значительно большее число частиц с высокой энергией может быть получено в ускорителях. В частности, многие внутренние свойства протона были определены путем простреливания их быстрыми электронами и пи-мезонами.

Остановимся прежде всего на опытах Хофштадтера, в которых протон и нейтрон простреливались электронами с энергией до 600 Мэв (эти быстрые электроны были получены на линейном ускорителе в г. Станфорде), и на опытах Вильсона, который, используя электронный синхротрон Корнеллского университета, довел энергию электронов до $1,3 \text{ Бэв}$.

Столь быстрые электроны оказались весьма подходящими для изучения структуры нуклона, так как они, ядерно не взаимодействуя с нуклонами (напомним, что электромагнитные силы примерно в тысячу раз слабее ядерных), смогли проникнуть в глубь нуклона и дать сведения об его электромагнитной структуре. Распреде-

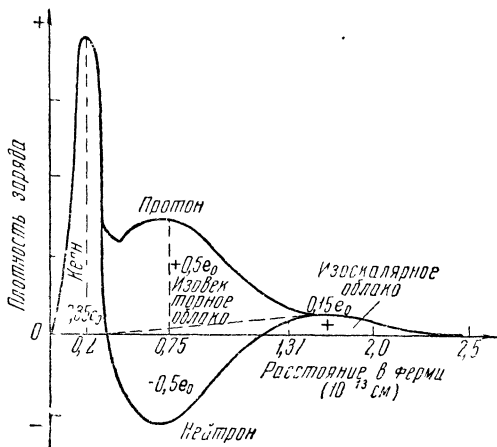


Рис. 5. Распределение электрического заряда в нуклоне. Изовекторное облако, по-видимому, в основном состоит из ро-мезонов (соединение двух пи-мезонов), а изошкалярное из омега-мезонов (соединение трех пи-мезонов)

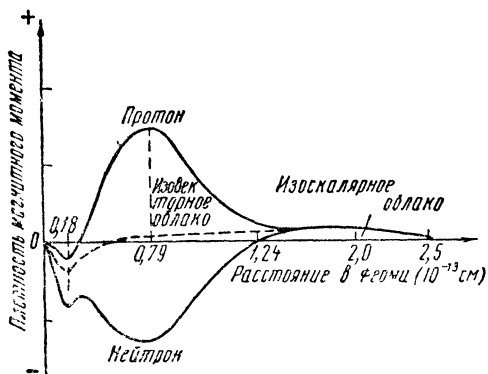


Рис. 6. Распределение anomального магнитного момента в нуклоне

ления электрического заряда в нуклоне и его магнитного момента характеризуются кривыми, изображенными соответственно на рис. 5 и 6.

Из этих кривых видно, что нуклон — частица не точечная. Он состоит из ядра (т. е. наиболее уплотненной части, где сосредоточена основная часть массы), который как для протона, так и для нейтрона заряжен положительно, и двух оболочек, состоящих, по-видимому, из пи-мезонов (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Распределение заряда и магнитного момента в нуклоне

	Заряд, e_0	Среднеквадратичный радиус для распределения заряда, <i>ферми</i>	Аномальный магнитный момент, <i>паули</i>	Среднеквадратичный радиус для распределения магнитного момента, <i>ферми</i>
«Ядро»	0,35	0,2	-0,11	0,18
Изовекторное облако	$\pm 0,50$	0,75	$\pm 1,00$	0,79
Изоскалярное облако	0,15	1,37	0,08	1,24

Примечания:

1 *ферми* = 10^{-13} см; 1 *паули* = $1/2 (\mu_p - \mu_n - \mu_{яд}) = 1,85 \mu_{яд}$, где

$$\mu_{яд} = \frac{e_0 \hbar}{2Mc^2} = \frac{1}{1836} \mu_0, \mu_0 - \text{магнетон Бора, а } M - \text{масса протона.}$$

Хотя кривые распределения электрического заряда и аномального магнитного момента несколько различны, среднеквадратичные радиусы имеют один и тот же порядок 0,8 *ферми*. Оболочка, непосредственно прилегающая к ядру, носит название изовекторной, так как знак заряда ее меняется при переходе от протона к нейтрону. Вторая, более удаленная, оболочка называется изоскалярной. Как для протона, так и для нейтрона она имеет один и тот же положительный заряд*.

С помощью мезонной «шубы» можно прежде всего попытаться объяснить появления аномального момента нуклона.

* Согласно последним данным изовекторная оболочка состоит из ро-мезонов (соединение двух пи-мезонов), а изоскалярная — из омега-мезонов (соединение трех пи-мезонов).

В самом деле волновое уравнение Дирака (без учета вакуума) дает для частицы со спином $1/2$, заряда e_0 и массы M магнитный момент, равный:

$$\mu_{\text{яд}} = \frac{e_0 \hbar}{2Mc}.$$

Поэтому по этой теории магнитный момент протона должен точно равняться ядерному магнетону, а магнитный момент нейтрона вообще должен отсутствовать, поскольку его заряд равен нулю.

В то же время для протона экспериментальное значение магнитного момента составляет 2,8 ядерных магнетонов, т. е. на 1,8 единиц больше ожидаемого, а для нейтрона вместо нуля мы получаем 1,9 ядерных магнетонов.

Таким образом, мы имеем:

$$\mu_p = \mu_{\text{яд}} (1 + 1,8),$$

$$\mu_n = \mu_{\text{яд}} (0 - 1,9).$$

Первый член в скобках соответствует дираковскому магнитному моменту нуклона, а второй характеризует аномальный магнитный момент, обязанный мезонной «шубе». Мы видим, что если в теории электрона вакуумная часть составляет около одной тысячной части дираковского магнитного момента, то в теории нуклона вакуумная часть для протона превышает его дираковский момент примерно в два раза, а для нейтрона вообще определяет весь его магнитный момент.

Очень интересно поставить опыты, которые позволили бы произвести и обнаружить деформацию мезонной «шубы» протона. Для этого необходимо создать прежде всего очень сильные электромагнитные поля, способные заметно деформировать протоны. Может быть этими полями окажутся лучи лазера, световую энергию которых с помощью особых телескопических установок можно сконцентрировать и сделать в тысячи раз сильнее, чем для лучей Солнца.

Как известно, при прохождении сквозь атомы электронов последние в случае сравнительно небольших энергий взаимодействуют главным образом с электронами атомной оболочки. В этом случае должны наблюдаться резонансные явления (напомним, например, опыты Франка—Герца, когда были обнаружены резо-

нансные области при рассеянии электронов атомами ртути в области энергий 4,9 эв). При больших энергиях рассеиваемых электронов последние будут взаимодействовать с атомным ядром, когда уже резонансные явления должны отсутствовать.

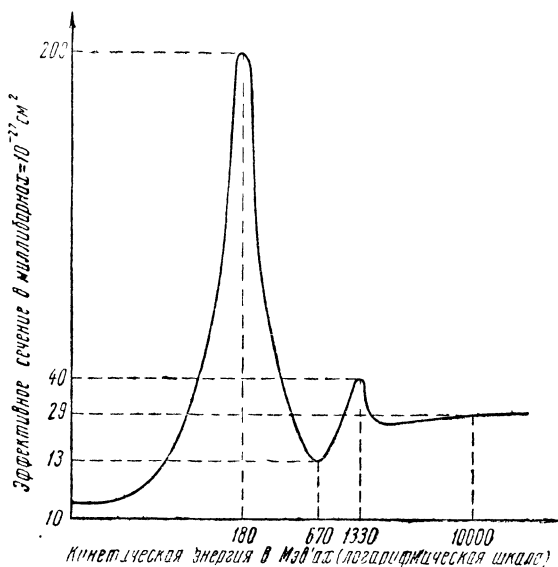


Рис. 7. Резонансы при рассеянии π^+ -мезонов протонами в лабораторной системе (начальный протон покоится)

Точно так же при рассеянии сравнительно медленных пи-мезонов нуклонами (с энергией 100—1500 Мэв) последние будут взаимодействовать с пи-мезонным облаком, образующим нуклонную оболочку. В этом случае при рассеянии π^+ -мезонов протонами будут наблюдаться резонансные области при кинетической энергии 180 и 1330 Мэв (рис. 7) *. При рассеянии π^- -мезонов прото-

* Барн — единица поперечного сечения, равная 10^{-24} см^2 (миллибарн равен 10^{-27} см^2).

Выбор этой величины связан с тем, что геометрические сечения атомных ядер имеют порядок 10^{-24} см^2 . Сечение в 1 барн означает, что при наличии одного такого ядра при попадании на единицу поверхности 10^{24} частиц одна из них будет поглощена.

нами резонансы будут соответствовать кинетическим энергиям 180, 605 и 890 Мэв (рис. 8). При больших энергиях (несколько тысяч Мэв) пи-мезоны будут рассеиваться ядром, т. е. ядром нуклона, когда уже никаких резонансных явлений не должно наблюдаться.

Как мы указывали, основными характеристиками элементарных частиц являются прежде всего масса покоя, электрический заряд и спин. Этими характеристиками

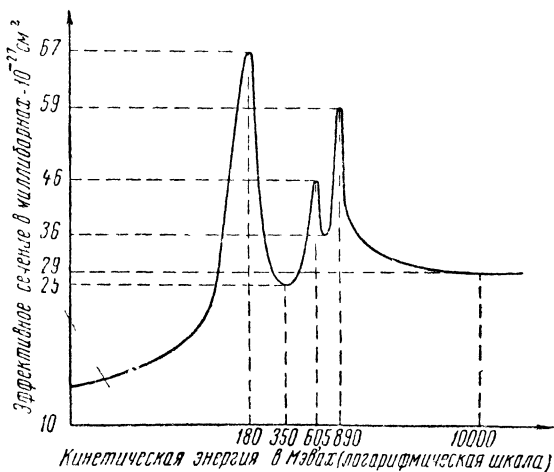


Рис. 8. Резонансы при рассеянии π^- -мезонов протонами в лабораторной системе

ками можно вполне ограничиться там, где мы имеем дело только с электромагнитными взаимодействиями (например, в атоме).

Спин определяет статистику частиц (частицы с полуполным спином подчиняются статистике Ферми и называются фермионами, а с целочисленным — статистике Бозе и называются бозонами), а также число возможных состояний, которое характеризуется различной проекцией спина на ось z . Если спин равен нулю ($s=0$), то, очевидно, возможно лишь одно состояние ($s_z=0$). Для частиц со спином $1/2$ возможны два состояния

$$(s_z = -1/2, \quad s_z = +1/2).$$

Для частиц с $s=1$ — три состояния

$$(s_z = -1, \quad s_z = 0, \quad s_z = +1)$$

и т. д.

Если, например, атом водорода поместить в магнитное поле, то к кулоновской энергии притяжения к ядру, не зависящей практически от спина, добавится небольшая энергия ΔE , обязанная магнитному взаимодействию, которая будет зависеть от направления спина:

$$\Delta E = - \frac{eH\hbar}{m_0c} s_z,$$

где

$$s_z = \pm 1/2.$$

При исследовании движения нуклонов в ядре основную роль играют ядерные силы, относящиеся к категории сильных взаимодействий, поскольку они на малых расстояниях (10^{-13} см) примерно в 1000 раз превышают электромагнитные. Ядерные силы, действующие между двумя протонами или двумя нейтронами или протоном и нейтроном, оказываются равными друг другу (зарядовая независимость). Учет же электромагнитного поля дает небольшие поправки к суммарной силе так же, как и в атоме магнитное поле дает относительно кулоновского взаимодействия небольшие поправки, зависящие от направления спина.

Поэтому Гейзенберг предложил протон и нейтрон рассматривать как одну частицу (так же как и два электрона с противоположно направленными спинами) и ввести новую переменную (по аналогии со спином электрона), так называемый изотопический спин, который будет характеризовать электрическое различие между протоном и нейтроном, небольшое по сравнению с ядерными силами.

Слово *изотопический* прежде всего означает, что протон и нейтрон образуют одно изотопическое семейство, т. е. имеют одинаковый ядерный заряд и почти одинаковую массу. Слово *спин* отражает тождественность математического описания изотопического и обычного спина.

По аналогии с пространственным спином для изотопического семейства, состоящего из двух состояний, изотопический спин выбирается равным половине ($I=1/2$),

как как по аналогии с проекцией спина проекция изотопического спина в данном случае в некотором условном изотопическом пространстве может принимать два значения: $I_3 = -1/2$ для нейтрона и $I_3 = +1/2$ для протона.

Для пи-мезонов основным взаимодействием является ядерное. Поэтому они могут быть также объединены в одно изотопическое семейство. Поскольку существуют три типа пи-мезона, то изотопический спин следует положить равным единице, причем для π^- -мезонов $I_3 = -1$, для π^0 -мезонов $I_3 = 0$ и для π^+ -мезонов $I_3 = +1$.

По аналогии с открытием позитрона (античастица относительно электрона) естественно было ожидать, что наряду с нуклонами (протоном и нейтроном) должны существовать также антинуклоны (антипротоны и антинейтроны). Антипротоны должны отличаться от протонов, например, знаком электрического заряда, а антинейтроны от нейтронов — знаком магнитного момента (напомним, что у нейтрона магнитный момент антипараллелен спину и поэтому имеет отрицательный знак, у антинейтрона же эти моменты должны быть параллельными).

Однако знак заряда не характеризует основное отличие антипротона от протона, так как в теории нуклонов главная роль принадлежит не электромагнитным, а ядерным силам.

Антинуклоны удалось открыть Сегре, Чемберлену и др. сравнительно недавно, когда был построен ускоритель на 6 Бэв в Беркли (США), получивший название беватрон. Трудности их открытия были связаны с тем обстоятельством, что энергия даже покоящихся нуклона и антинуклона (рождающихся совместно) составляет около 2 Бэв. Более точные расчеты показывают, что вероятность появления пары нуклон-антинуклон становится заметной, когда на мишень будут падать протоны с энергией не менее 6 Бэв.

Для описания основного отличия нуклонов от антинуклонов пришлось ввести особое барионное число B , положив для нуклонов $B = +1$, а для антинуклонов $B = -1$. Для остальных, более легких частиц (пи-мезоны, электроны и т. д.) $B = 0$.

В связи с этим следует заметить, что электрический заряд в теории элементарных частиц фактически играет две роли. Во-первых, он определяет величину кулонов-

ского взаимодействия. Во-вторых, во всех процессах, связанных с появлением и аннигиляцией элементарных частиц, электрический заряд должен строго сохраняться.

В теории элементарных частиц часто вторая особенность электрического заряда представляет наибольший интерес. Для описания второй особенности за единицу заряда можно выбрать элементарный заряд e_0 . Тогда для электрона и антипротона электрический заряд $Q = -1$, а для позитрона и протона $Q = +1$, и, наконец, для нейтрона и антинейтрона $Q = 0$.

Во всех реакциях строго должен соблюдаться закон сохранения электрического заряда:

$$\Sigma Q = \text{const.}$$

В самом деле, электрон всегда должен рождаться с позитроном, а протон с антипротоном. Однако закон сохранения электрического заряда является явно недостаточным, так как он не запрещает, например, рождение двух нейтронов.

При рождении же нуклонов должен строго соблюдаться еще второй закон, а именно закон сохранения барионного числа:

$$\Sigma B = \text{const.},$$

что является в теории нуклонов еще более важным, так как запрещает при столкновении протона и нейтрона их превращение в более легкие частицы (например, в π^+ - и π^0 -мезоны), хотя исходя только из закона сохранения электрического заряда, это превращение казалось бы вполне возможным.

Из закона сохранения барионного числа следует, что нуклоны являются устойчивыми частицами и только при столкновении с антинуклонами они могут превращаться в более легкие частицы. Точно так же одновременное порождение двух нейтронов совершенно недопустимо. Нейтроны могут рождаться совместно с антинейтронами, когда будет соблюдаться закон сохранения барионного числа.

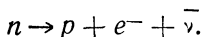
§ 4. БЕТА-РАСПАД И ОТКРЫТИЕ НЕЙТРИНО

Дальнейшее развитие учения об элементарных частицах связано с открытием нейтрино.

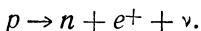
Внутри стабильных ядер нейтрон может существо-

вать неопределенно долго. В свободном состоянии нейтрон является нестабильной частицей с периодом полураспада, равным примерно 12 мин (время жизни равно $\frac{12}{\ln 2} \approx 17 \text{ мин} \approx 1000 \text{ сек}$). Далее при бета-распаде

масса нейтрона, превращающегося в протон, уменьшается на величину, соответствующую энергии $2,5 m_0 c^2$, в то время как электрон, с учетом его собственной энергии ($m_0 c^2$); вылетает с самыми разнообразными энергиями, начиная от $m_0 c^2$ и кончая $2,5 m_0 c^2$. Средняя энергия электронов равняется только $1,5 m_0 c^2$, т. е. при каждом акте распада теряется в среднем энергия порядка $m_0 c^2$. Кроме того, следует еще добавить, что все процессы, протекающие в атоме и атомном ядре, должны быть, как правило, дискретными. Свет, излучаемый атомом, образует монохроматические линии. Альфа-частицы, вылетающие из ядра, обладают определенной энергией и т. д. Поэтому долгое время оставалась совершенно непонятной непрерывность бета-спектра. На этом основании ряд крупнейших физиков, в том числе и Нильс Бор, одно время стали вообще говорить о том, что в микромире закон сохранения энергии может и не иметь места. Для объяснения кажущейся потери энергии Паули в 1930 г. выдвинул гипотезу, согласно которой при бета-распаде эта потерянная энергия уносится какой-то другой частицей, которая получила название *антинейтрино*, т. е. реакция бета-распада имеет вид:



Аналогично при позитронном распаде образуется нейтрино:



Долгое время вообще было не ясно, отличается ли чем-нибудь нейтрино от антинейтрино. Однако это различие было затем установлено. На этом вопросе мы остановимся несколько позднее. Пока что определим антинейтрино как частицу, которая образуется при распаде нейтрона, а нейтрино — при распаде протона*.

* Формально для описания этого различия можно ввести лептонный заряд, причем для нейтрино и электрона он равен плюс единице (+1), для антинейтрино и позитрона — минус единице (-1), а для нуклонов нулю. Поэтому, чтобы в реакциях при бе-

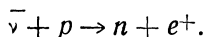
Эти бета-превращения совершаются крайне редко и объяснены так называемому слабому взаимодействию.

Таким образом, мы имеем три вида взаимодействия: сильное, обуславливающее ядерные силы, электромагнитное и, наконец слабое, обуславливающее, например, распад нейтрона, не считая еще гравитационного взаимодействия, которое мы здесь не рассматриваем.

Нейтрино, а также антинейтрино обладают большой проникающей способностью и поэтому эти частицы в течение долгого времени оставались вообще не наблюдаемыми.

Нейтрино свободно пронизывает Землю, Солнце, звезды с массой, во много раз превышающей массу Солнца, и т. д. Только в 1957 г. Райнесу и Коуэну удалось обнаружить антинейтрино, когда был построен мощный источник этих неуловимых частиц (реактор мощностью в 300 тысяч киловатт). Этот реактор, как показывают теоретические расчеты, должен испускать в каждую секунду 10^{19} антинейтрино и на расстоянии 10 м от реактора на каждый квадратный сантиметр в одну секунду должно падать примерно 10^{13} (т. е. десять тысяч миллиардов) антинейтрино.

Антинейтрино было поймано протонами водородсодержащего вещества по реакции, обратной бета-распаду*:

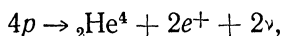


Тонна воды поглощала лишь единичные частицы столь мощного потока антинейтрино и на каждый час приходилось примерно 100 превращений протона в нейтрон и позитрон (эффективное сечение оказалось равным по порядку 10^{-44} см²). Эта реакция фиксировалась двумя вспышками, регистрируемыми фотоэлементами. Первую вспышку давал позитрон, а вторую гамма-квант, возникающий при захвате нейтрона ядром водорода. Опыты носили столь прецизионный характер, что для их подготовки и выполнения потребовалось более пяти лет.

га-распаде сохранялся также и лептонный заряд, электрон всегда должен появляться вместе с антинейтрино, а позитрон — с нейтрино. Введение нейтрино приводит к сохранению при бета-распаде не только энергии, но и спина

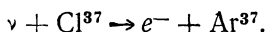
* Заметим, что вследствие сохранения лептонного заряда нейтрино (т. е. частица, образующаяся при распаде протона) не может быть поймано по этой реакции

В результате термоядерных реакций, происходящих на Солнце, образуется нейтрино, а не антинейтрино, поскольку при этих реакциях (как в случае водородного цикла, так и в случае цикла Бете) в конечном результате четыре протона переходят в гелий



причем полное число нейтрино составляет несколько процентов от всей энергии, излучаемой Солнцем.

В связи с открытием нейтрино особое значение приобретает нейтринный анализ космических светил, и в первую очередь Солнца. Дело в том, что долгое время сведения о Солнце мы получали, изучая световой спектр Солнца, поток космических частиц, а также недавно открытое радиоизлучение. Все это позволяет изучать только свойства оболочки Солнца. Поскольку нейтрино совершенно свободно пронизывает Солнце, то попадающие на Землю нейтрино будут исходить также из реакций, происходящих внутри Солнца. Следует ожидать, что в среднем на один квадратный сантиметр в одну секунду падает 10 миллиардов (10^{10}) антинейтрино, т. е. в тысячу раз меньше, чем от ядерного котла в опытах Райнеса и Коуэна. Поскольку водород поглощает только антинейтрино, для улавливания нейтрино необходимо использовать другое вещество. В качестве мишени для поимки нейтрино можно взять несколько десятков тонн сравнительно дешевого четыреххлористого углерода. Поглощенные нейтрино должны происходить по реакции *



В настоящее время в г. Дубне готовятся опыты для поимки солнечного нейтрино. Основная трудность опыта будет заключаться в том, чтобы суметь зарегистрировать единичные акты обнаружения нейтрино. Конечно, для этого потребуются создание сложных и более прецизионных установок по сравнению с установками Райнеса и Коуэна.

* Эффективное сечение захвата отдельного нейтрино, излучаемого Солнцем, будет примерно таким же, как и в опытах Райнеса и Коуэна, поскольку энергия нейтрино в обоих случаях имеет порядок нескольких *Мэв*. Однако если бы удалось получить нейтрино с энергией в несколько *Бэв*, то эффективное сечение захвата должно было бы резко возрасти

Нейтринный анализ имеет огромные перспективы, так как всепроникающее нейтрино является, так сказать, живым свидетелем образования новых звезд и вообще всей нашей Галактики. Нейтринной астрофизике, бесспорно, принадлежит большое будущее.

§ 5. ПРОБЛЕМА НЕСОХРАНЕНИЯ ЧЕТНОСТИ

В связи с открытием античастиц на повестку дня поставлен вопрос об искусственном образовании антиатомов. Вокруг ядра антиатома, состоящего из антипротонов и антинейтронов, должны вращаться позитроны. При столкновении атомов и антиатомов следует ожидать их превращения в световые кванты, в пи-мезоны (ядерные кванты) и т. д. Если бы произошло столкновение масс, состоящих из вещества и антивещества или, как иногда говорят, «мира» и «антимира», то выделяемая энергия должна в тысячи раз превышать ту энергию, которая образуется при ядерных реакциях. В самом деле, в первом случае образующаяся энергия равнялась бы $2Mc^2$, где M — общая масса антивещества, в то время как при ядерных реакциях в лучшем случае высвобождаются только доли процента собственной энергии ядра.

Однако если изолировать антиатомы от атомов, то они могут существовать сколь угодно долго и поэтому некоторые ученые вообще не исключают возможность существования антимиров, состоящих из антиатомов.

С первого взгляда может показаться, что все физические явления, происходящие в изолированном антимире, должны быть совершенно тождественными соответствующим явлениям, наблюдаемым в окружающем нас мире, поскольку казалось бы переход от мира к антимиру, сводящийся к замене всех электрических и нуклонных зарядов на противоположные, не может изменить величину электромагнитных и ядерных сил, действующих между частицами. В частности, спектральные линии, излучаемые водородом и антиводородом, должны быть совершенно тождественными и ни один спектроскопист не только не сумеет их различить, но не сможет даже указать способа, как это сделать.

Однако недавно Ли и Янгом было сделано чрезвычайно важное открытие, известное под названием несохранения четности, которое позволяет найти асимметрию

некоторых физических явлений, происходящих в мире и антимире. Эта асимметрия была прежде всего обнаружена при распаде частиц с участием нейтрино. Вначале предполагалось, что нейтрино ничем не отличается от антинейтрино (гипотеза Майорана). Это означало бы, например, что нейтрон может не только испускать антинейтрино, но также наряду с нейтрино поглощать и антинейтрино.

Однако эксперименты показали, что антинейтрино не может поглощаться нейтроном. Этот вывод сделан на основе отрицательных результатов опытов по двойному бета-распаду, в которых было показано, что невозможно испускание ядром только двух электронов без антинейтрино: один нейтрон испускает электрон и антинейтрино, а другой должен поглотить это антинейтрино и испустить второй электрон.

Вводя закон сохранения лептонного заряда, можно понять, почему при распаде нейтрона должно испускаться антинейтрино (а не нейтрино) и в то же самое время почему нейтрон может поглощать только нейтрино, т. е. частицу, испускаемую протоном.

Рассмотрим более подробно вопрос о возможном проявлении асимметрии физических явлений в микромире при зарядово-сопряженном преобразовании (*C*-преобразование), т. е. при замене всех частиц соответствующими античастицами.

Для того чтобы при *C*-преобразовании могла проявляться асимметрия, необходимо ввести в исходные уравнения какую-то неинвариантность относительно *C*-преобразования. Эта неинвариантность не должна нарушать общих правил преобразования, которым должны удовлетворять основные уравнения, описывающие движение элементарных частиц. К числу допустимых следует отнести такие преобразования, которые сохраняют инвариантность теории относительно преобразований Лоренца и удовлетворяют *CPT*-теореме Людерса—Паули.

Согласно *CPT*-теореме волновые уравнения должны сохранять свою инвариантность при одновременном совершении трех преобразований: а) *инверсии пространства*, т. е. при замене правой системы координат на левую (*P*-преобразование). При этом все три пространственные составляющие вектора, например радиус-вектора \vec{r} , и вектор-потенциала \vec{A} , изменяют свой знак

$(\vec{r} \rightarrow -\vec{r}, \vec{A} \rightarrow -\vec{A})$; б) *обращении времени* (T -преобразование), когда время t , а также четвертые составляющие вектора (например, скалярный потенциал Φ) изменяют свой знак на противоположный ($t \rightarrow -t, \Phi \rightarrow -\Phi$); в) *зарядово-сопряженного преобразования* (C -преобразование), когда электроны заменяются позитронами и т. д. В частности, в случае наличия только электромагнитного поля зарядово-сопряженное преобразование сводится просто к замене знака электрического заряда.

Для примера рассмотрим инвариантность релятивистской функции Лагранжа классической электродинамики:

$$L = -m_0 c^2 \sqrt{1 - v^2/c^2} - e\Phi + \frac{e}{c} (\vec{A}\vec{v}),$$

где \vec{v} — скорость движения электрона. Очевидно, что эта функция сохраняет свою инвариантность относительно преобразований Лоренца, а также инверсии пространства ($\vec{A} \rightarrow -\vec{A}, \vec{v} \rightarrow -\vec{v}$).

Однако относительно T -преобразования ($\Phi \rightarrow -\Phi, \vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \rightarrow -\vec{v}$) и C -преобразования ($e \rightarrow -e$) по отдельности она не будет сохранять свою инвариантность. Только совместное CT -преобразование, а вместе с тем и совместное CPT -преобразование сохраняет инвариантность функции Лагранжа L . Поэтому это выражение для классической функции Лагранжа является вполне допустимым с точки зрения общей теории волновых уравнений.

Совместное $CT = T'$ -преобразование носит название слабого обращения времени (в отличие от T -преобразования, называемого сильным), а преобразование $CPT = R'$ называют слабым четырехмерным отражением пространства и времени. Таким образом, уравнения классической электродинамики, а также, как мы затем покажем, и уравнения любой релятивистской теории поля должны сохранять свою инвариантность относительно слабого четырехмерного отражения (R' -преобразование).

Асимметрия волнового уравнения нейтрино относительно C -преобразования была введена Ли и Янгом в 1956 г. При этом они предположили, что нейтрино отличается от антинейтрино не только лептонным зарядом (не нарушающим симметрию при C -преобразовании), но

еще и спиральностью, т. е. круговой поляризацией. По этой теории нейтрино должно напоминать собой фотон, обладающий левой круговой поляризацией (левовинтовая частица), а антинейтрино — правополяризованный фотон (правовинтовая частица).

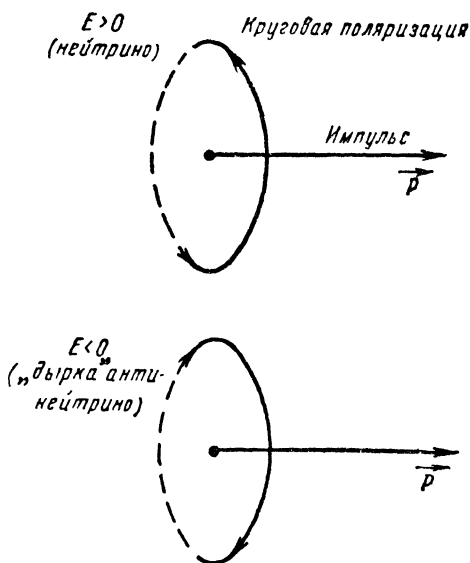


Рис 9 Спиральность нейтрино и антинейтрино

Отличие нейтрино от поляризованных фотонов заключается только в величине спина. Для фотона спин равен единице (в единицах \hbar), а для нейтрино — половине.

Нейтрино (частица с $E > 0$) и антинейтрино (античастица, т. е. «дырка» на фоне частиц с $E < 0$) изображены на рис. 9. Из этого рисунка видно, что для частиц с левой спиральностью (нейтрино) при ввинчивании буравчика по направлению импульса его вращение будет совпадать с направлением поляризации*, если нарезка бу-

* В оптике, наоборот, буравчик ввинчивают от наблюдателя, т. е. против движения фотона и поэтому левовинтовой фотон называют правополяризованным. Однако это рассмотрение в современной теории элементарных частиц, как правило, не используется.

равчика будет левая (см. верхний рисунок). Правовинтовое антинейтрино изображено на нижнем рисунке.

Для описания нового свойства нейтрино с массой покоя, точно равной нулю, можно, вообще говоря, использовать двухкомпонентное уравнение Вейля. Однако это уравнение остается не инвариантным при переходе от правой системы координат к левой. Последнее было интерпретировано Ли и Янгом, а также Ландау как переход при P -преобразовании левовинтового нейтрино в правовинтовое, т. е. в несуществующее состояние.

Чтобы правовинтовое нейтрино сделать вновь существующим, они предложили P -преобразование дополнить еще C -преобразованием. Тогда в результате этих двух совместных преобразований левовинтовое нейтрино должно превратиться уже в реально существующее правовинтовое антинейтрино. Символически это может быть записано в виде $CP = \text{const}$.

Последнее преобразование было названо ими комбинированной инверсией.

Если эта точка зрения оказалась бы правильной, то познанная закономерность несохранения четности представляла бы собой синтез наблюдателя и частицы, и в этом отношении она напоминала бы собой копенгагенскую интерпретацию корпускулярно-волнового дуализма.

В самом деле, выбор правой или левой системы координат зависит исключительно от воли наблюдателя, и поэтому он никак не может сказаться на каких-либо свойствах элементарных частиц. Поэтому при P -преобразовании левовинтовые частицы должны остаться левовинтовыми, только может измениться математическая форма описания левого винта.

Несохранение четности, открытое Ли и Янгом, позволило, наконец, дать правильную теорию распада частиц с участием нейтрино. В то же самое время интерпретация этого явления с помощью комбинированной инверсии вызывает у нас серьезные возражения.

Попробуем дать другую интерпретацию несохранения четности, воспользовавшись простыми геометрическими соображениями. С этой целью опишем правую спиральность в правой и левой системах координат.

Из рис. 10 видно, что правая спиральность в правой и левой системах координат описывается противоположно направленными аксиальными векторами спинов

В правой системе координат аксиальный вектор параллелен импульсу:

$$s^r = \frac{(\vec{s}^r \vec{p})}{p} = 1;$$

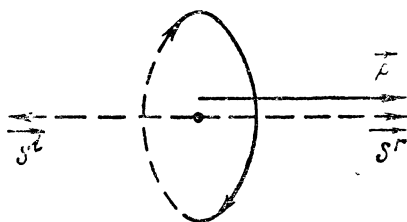
в левой же системе — антипараллелен:

$$s^l = \frac{(\vec{s}^l \vec{p})}{p} = -1.$$

Точно так же для описания левой спиральности мы будем иметь:

$$s^r = -s^l = -1.$$

Изменение знака у проекции аксиального вектора спина при переходе от правой системы координат к левой было бы неправильно толковать как изменение самой спиральности.



Круговая поляризация

Рис 10. Правополяризованная частица: \vec{p} — импульс (полярный вектор), \vec{s}^r — единичный вектор спина в правой системе (аксиальный вектор), \vec{s}^l — единичный вектор спина, описывающий ту же поляризацию в левой системе

Для иллюстрации нашей мысли приведем следующий пример. Допустим, что наблюдатели летят на винтовом самолете, пропеллер которого относительно скорости самолета описывает правый винт. Те наблюдатели, которые изберут для своих исследований правую систему ко-

ординат, будут утверждать, что угловая скорость (аксиальный вектор) параллельна скорости движения самолета (полярный вектор). Другие же наблюдатели, которые изберут левую систему координат (т. е. с точки зрения первых проделают P -преобразование), будут утверждать обратное — что угловая скорость антипараллельна скорости движения самолета, хотя физически реальный процесс, который те и другие наблюдатели описывают различными математическими способами, будет представлять собой одно и то же, а именно правовинтовое движение пропеллера.

Мы сможем описать свойства поляризованного нейтрино, если волновую функцию уравнения Дирака

$$(E - c\rho_1 (\vec{\sigma} \vec{p}) - \rho_3 m_0 c^2) \psi = 0, \quad (3)$$

где ρ_n и $\vec{\sigma}$ — известные матрицы Дирака, а E и \vec{p} — операторы энергии и импульса, подчиним еще дополнительному условию:

$$\frac{(\vec{\sigma} \vec{p})}{p} \psi = s\psi. \quad (4)$$

Исследуем для примера решение, соответствующее положительной энергии и импульсу, параллельному оси z :

$$\psi = b e^{-iEt + ipz},$$

где ради простоты положено $\hbar=1$. Тогда, вводя составляющие вектора поляризации, направленные перпендикулярно к импульсу, $b_x = \sigma_1 b$ и $b_y = \sigma_2 b$, получим

$$b_y = i s b_x. \quad (5)$$

Отсюда видно, что для правовинтового антинейтрино $(\bar{\nu})$ $s^r = -s^l = 1$, а для левовинтового нейтрино (ν) $s^r = -s^l = -1^*$.

* По четырехкомпонентной теории возможно и второе решение, когда нейтрино (ν') будет правовинтовым, а антинейтрино $(\bar{\nu}')$ — левовинтовым.

Для того чтобы не только уравнение Дирака, но и дополнительное условие (4) (а вместе с тем и спиральность) оставались инвариантными относительно преобразований Лоренца, необходимо было положить, так же как и в двухкомпонентной теории, массу нейтрино точно равной нулю.

В дальнейшем мы будем рассматривать то или иное преобразование инвариантным, если оно оставляет спиральность как нейтрино, так и антинейтрино без изменений, несмотря на то что при этом может измениться математическая форма описания спиральности.

Как и в случае классической электродинамики, уравнение поляризованного нейтрино остается инвариантным не только относительно P -преобразования, но и относительно совместного CT -преобразования, т. е. слабого обращения времени.

Для того чтобы это показать, отнесем состояния с положительной энергией к нейтрино (амплитуда или оператор b_ν), а с отрицательной — к антинейтрино (оператор b_ν^\pm):

$$\begin{aligned} \psi = & b_\nu(\vec{p}_\nu, s_\nu^r) e^{-iE_\nu t + \vec{p}_\nu \cdot \vec{r}} + \\ & + b_\nu^\pm(\vec{p}_\nu^-, s_\nu^r) e^{iE_\nu^- t - i\vec{p}_\nu^- \cdot \vec{r}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Первоначальные импульсы нейтрино и антинейтрино выберем параллельными друг другу

$$(\vec{p}_\nu = \vec{p}_\nu^- = \vec{p}),$$

а спиральности — различными

$$(s_\nu^r = -s_\nu^r = -1).$$

С учетом вторичного квантования оператор b_ν , стоящий множителем у экспоненты e^{-iEt} , следует считать оператором поглощения, так как, будучи умноженным на сопряженный оператор (т. е. величина $b^\dagger b$), он дает отличное от нуля значение, когда в начальный момент имеется одна частица. В случае отсутствия частиц величина $b^\dagger b$ равна нулю. Точно так же оператор b^\dagger , стоящий множителем у экспоненты e^{iEt} , является оператором по-

явления, так как величина bb^+ для фермионов отлична от нуля только в случае отсутствия частиц.

После T -преобразования ($t \rightarrow -t'$) волновую функцию мы представим в виде:

$$\begin{aligned} \psi' = & b'_v (\vec{p}'_v, s'_v) e^{-iE'_v t' + \vec{p}'_v \vec{r}} + \\ & + b'^{+}_v (\vec{p}'_v, s'_v) e^{iE'_v t' - \vec{p}'_v \vec{r}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Сопоставляя (7) с (6), мы видим, что в результате T -преобразования оператор появления антинейтрино перейдет в оператор поглощения нейтрино ($b_v^+ \rightarrow b'_v$), а импульс и спиральность будут изменяться по закону.

$$\begin{aligned} \vec{p} \rightarrow -\vec{p}', \quad s_v^r \rightarrow s'_v{}^r = -s_v^r, \quad * \\ -s_v^r \rightarrow s'_v{}^r = s_v^r, \end{aligned} \quad (8)$$

т. е. левовинтовое нейтрино перейдет в правовинтовое, что можно изобразить с помощью зеркала, поставленного перпендикулярно импульсу (рис. 11). Изменение спиральности нейтрино мы будем рассматривать как инвариантность теории относительно сильного обращения времени (символически $T \neq \text{const}$).

При C -преобразовании изменяется знак лептонного заряда, т. е. вместо (6) мы будем иметь

$$\begin{aligned} \psi' = & b'_v (\vec{p}'_v, s'_v) e^{-iE'_v t + \vec{p}'_v \vec{r}} + \\ & + b'^{+}_v (\vec{p}'_v, s'_v) e^{iE'_v t - \vec{p}'_v \vec{r}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Сопоставляя (9) с (6), мы видим, что в результате C -преобразования оператор появления антинейтрино переходит в оператор появления нейтрино. Для импульса и спиральности мы будем иметь:

$$\begin{aligned} \vec{p} \rightarrow \vec{p}', \quad s_v^r \rightarrow s'_v{}^r = -s_v^r, \\ s_v^r \rightarrow s'_v{}^r = -s_v^r, \end{aligned} \quad (10)$$

* С помощью формул (4) и (5) можно показать, что при всех рассматриваемых ниже преобразованиях, даже когда операторы уничтожения могут обращаться в операторы появления, а операторы нейтрино — в операторы антинейтрино, спиральность, относящаяся к данному оператору, остается без изменения, т. е.

$$s^r = -s^l = s^r = \text{const}$$

т. е. левовинтовое нейтрино перейдет в правовинтовое (символически $C \neq \text{const}$). Зарядово-сопряженное преобразование для нейтрино также можно изобразить с помощью одного зеркала, но оно в данном случае должно быть поставлено параллельно (рис. 11), а не перпендикулярно импульсу, как при T -преобразовании.

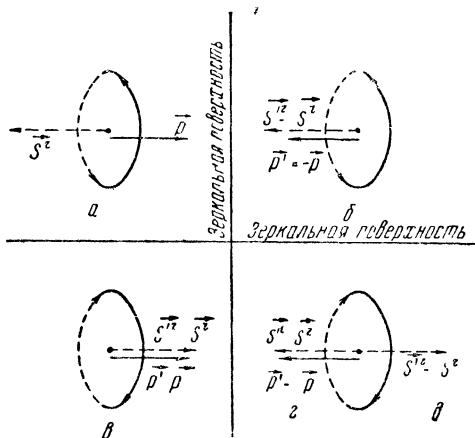


Рис 11 Изображение с помощью зеркал изменения спиральности нейтрино (частицы с положительной энергией) при T , C и P -преобразованиях a — начальная спиральность, левовинтовое нейтрино (правая система координат), $б$ — T -преобразование, правовинтовое нейтрино (правая система координат), $в$ — C -преобразование, правовинтовое нейтрино (правая система координат), $г$ — P -преобразование, левовинтовое нейтрино (левая система координат), $д$ — TC -преобразование, левовинтовое нейтрино (правая система координат)

Совместное $TC=TC'$ -преобразование (т. е. слабое обращение времени) оставляет теорию инвариантной. В этом случае, как нетрудно видеть из равенств (6), (7) и (9), оператор появления антинейтрино перейдет в оператор поглощения того же антинейтрино, а для новых импульсов и спиральностей мы будем иметь:

$$\vec{p} \rightarrow -\vec{p}', \quad s_v^r \rightarrow s_v'^r, \quad \vec{s}_r \rightarrow -\vec{s}_v'^r. \quad (11)$$

Отсюда видно, что слабое обращение времени эквивалентно двойному зеркальному отражению (см. рис. 11), при котором левовинтовое нейтрино остается левовинтовым.

Наконец, при инверсии пространства ($\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$) оператор появления антинейтрино остается тем же оператором появления антинейтрино, а импульс и спиральность изменяются по хорошо известному из векторной алгебры правилу:

$$\vec{p} \rightarrow -\vec{p}', \quad \vec{s}_v \rightarrow -\vec{s}_v^l, \quad \vec{s}_v^r \rightarrow \vec{s}_v^l. \quad (12)$$

Отсюда видно, что при P -преобразовании левовинтовое нейтрино остается левовинтовым. Однако если за характеристику спиральности взять имеющее условный смысл направление аксиального вектора, то изменится при этом лишь математическая форма описания левого винта.

В связи с этим заметим, что с помощью одного зеркала можно описать P -преобразование при наличии либо одних параллельных полярных векторов (зеркало следует поставить перпендикулярно этим векторам), либо одних параллельных аксиальных векторов (зеркало следует поставить параллельно этим векторам).

При наличии же параллельных полярного и аксиального вектора (т. е. спиральности) P -преобразование, так же как и CT -преобразование, можно описать с помощью двух отражений (см. рис. 11).

Перейдем к анализу другой возможной асимметрии относительно C -преобразования, которая является следствием не поляризации нейтрино, как в предыдущем случае, а комплексностью коэффициентов связи G_j четырехфермионного взаимодействия.

В этом случае энергия связи имеет вид

$$U = \sum_I G_j (\psi_p^+ \gamma_j \psi_n) (\psi_e^+ \gamma_j \psi_\nu),$$

а

$$U^+ = \sum_I G_j^+ (\psi_n^+ \gamma_j \psi_p) (\psi_\nu^+ \gamma_j \psi_e), \quad (13)$$

где ψ_p^+ — волновая функция протона, ψ_n — волновая функция нейтрона и т. д., а γ_j — дираковские матрицы

цы, определяющие характер взаимодействия.

В частности, в случае комбинации векторной ($G_j = G_V$, $\gamma_j = I$) и псевдовекторной ($G_j = G_A$, $\gamma_j = \vec{\sigma}$) связи четырехфермионное взаимодействие (13) остается скаляром, так как представляет собой внутреннее произведение вектора на вектор и псевдовектора на псевдовектор, в то время как по двухкомпонентной теории энергия взаимодействия представляет собой сумму скаляра и псевдоскаляра.

Посмотрим теперь, на каких конкретных эффектах могут сказаться эти два проявления асимметрии при C -преобразовании.

Чтобы учесть поляризацию частиц, следует потребовать, чтобы волновые функции удовлетворяли не только уравнению Дирака (3), но и дополнительному условию (4). Для протона, нейтрона, позитрона и электрона возможны два поляризованных состояния ($s = \pm 1$), для нейтрино, масса которого равняется нулю, — только одно, причем для нейтрино $s_v^r = -s_v^l = -1$, а для антинейтрино $s_v^r = -s_v^l = 1$.

Вероятность распада нейтрона пропорциональна матричному элементу:

$$R_{n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}} = U^+ U, \quad (14)$$

а антинейтрона — матричному элементу:

$$R_{\bar{n} \rightarrow \bar{p} + e^+ + \nu} = U U^+. \quad (15)$$

В случае, когда распадается нейтрон с ориентированным спином, учет поляризационных свойств нейтрино дает следующую формулу для описания асимметрии числа вылетевших электронов:

$$R = \text{const} (1 - \beta a s_n s_{\bar{\nu}} (\vec{p}_n^0 \vec{p}_e^0)), \quad (16)$$

где

$$a = \frac{2G_A^+ G_A + G_V^+ G_A + G_A^+ G_V}{G_V^+ G_V + 3G_A^+ G_A}, \quad (17)$$

β — скорость вылетевших электронов, \vec{p}_e^0 и \vec{p}_n^0 — единичные векторы импульсов электрона и нейтрона. Для

покоящегося нейтрона направление \vec{p}_n^0 следует выбрать таким образом, чтобы оно образовывало с его круговой поляризацией правый винт.

Тогда при распаде свободного нейтрона как в правой, так и в левой системах координат можно положить $s_n s_{\bar{\nu}} = 1$. Это явление асимметрии, так же как и другие явления, следующие из теории несохранения четности, были подтверждены рядом прецизионных опытов (Ву, Телегди, Ледерман и др.), причем для величины a было установлено значение 0,11.

Отсюда в случае вещественности коэффициентов G следует

$$G_A = -1,2 G_V.$$

Определив экспериментально период полураспада нейтрона (11,7 мин), можно вычислить численное значение для коэффициента

$$G_V = (1,42 \pm 0,03) \cdot 10^{-49} \text{ эрг} \cdot \text{см}^3.$$

Из формулы (16), в частности, видно, что в направлении, образующем с круговой поляризацией нейтрона правый винт, вылетает меньшее число электронов, чем в противоположном. При определении распада антинейтрона матричный элемент (15) также приводит к формулам вида (16) и (17), если в последних произвести замену:

$$G \rightarrow G^+, \quad s_{\bar{\nu}} \rightarrow s_{\nu}, \quad s_n \rightarrow s_{\bar{n}}. \quad (18)$$

Эта замена, очевидно, не изменит численного значения коэффициента a (см. (17)), но дает другой знак при произведении $s_{\bar{n}} s_{\nu}$, так как нейтрино обладает другой спиральностью по сравнению с антинейтрино^{*}:

$$s_{\nu} = -s_{\bar{\nu}}.$$

Отсюда следует, что при распаде антинейтрона мы будем иметь асимметрию, противоположную той асим-

* В атомном ядре возможен также позитронный распад ($p \rightarrow n + e^+ + \nu$). Тогда исходя из выражения (15), чтобы перейти от формул ядерного электронного бета-распада к формулам позитронного распада, имеющим также вид (16) и (17), мы должны в последних сделать замену:

$$G_V \rightarrow G_V^+; \quad G_A \rightarrow -G_A^+; \quad s_{\bar{\nu}} \rightarrow s_{\nu}, \quad s_n \rightarrow s_p.$$

метрии, которая наблюдается при распаде нейтрона, т. е. по направлению, образуемому с круговой поляризацией антинейтрона правый винт, будет вылетать наибольшее число позитронов. Напомним, что при распаде нейтрона по этому направлению вылетало наименьшее число электронов.

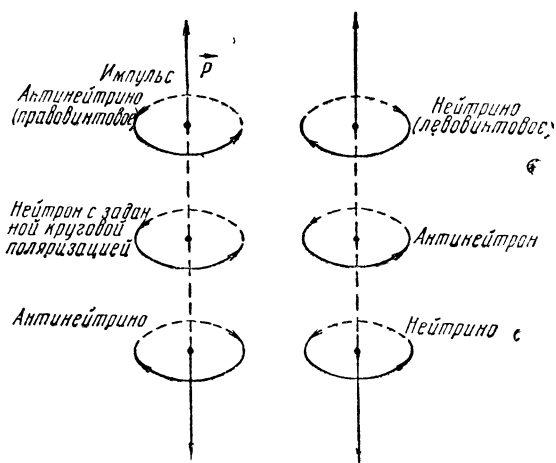


Рис. 12. Возникновение пространственной и зарядовой асимметрий при распаде нейтрона и антинейтрона

Геометрически возникновение пространственной асимметрии, обусловленной спиральностью нейтрино, изображено на рис. 12. Поскольку там спиральность описывается вращением (а не аксиальным вектором спина), то как в правой, так и в левой системе координат асимметрия будет иметь один и тот же вид, т. е. круговая поляризация при P -преобразовании сохранит свою ориентацию относительно импульса.

Если нейтрон является неполяризованным, то несохранение четности (обязанное спиральности нейтрино) должно привести к поляризации электронов, степень которой характеризуется формулой

$$R = \text{const} (1 - s_e s_\nu^- \beta). \quad (19)$$

Отсюда видно, что как в правой, так и в левой системах координат будут образовываться главным образом левовинтовые электроны ($s_e s_{\bar{\nu}} = -1$), поскольку антинейтрино является правовинтовым ($s_{\bar{\nu}}^r = -s_{\bar{\nu}}^l = 1$). При распаде же антинейтрона будут вылетать главным образом правовинтовые позитроны, так как в (19) следует сделать замену $s_e s_{\bar{\nu}} \rightarrow s_{\bar{e}} s_{\nu}$ и положить $s_{\bar{e}}^r = -s_{\bar{e}}^l = -1$. В ультрарелятивистском случае ($\beta=1$) степень поляризации электронов и позитронов должна стремиться, очевидно, к 100%.

Если коэффициенты G являются комплексными, то возможно еще третье проявление несохранения четности, связанное с новой зарядовой асимметрией, которую внесут комплексные значения коэффициентов G в матричные элементы (14) и (15).

Исследуя при этом распад поляризованного нейтрона, мы найдем, что комплексность коэффициентов G дает азимутальную асимметрию, максимум которой лежит в плоскости, перпендикулярной спину нейтрона ($\theta = \frac{\pi}{2}$), когда полярная асимметрия (см. (16)) вообще исчезает.

При распаде нейтрона эта азимутальная асимметрия будет характеризоваться следующим дополнительным членом:

$$\Delta R = \text{const } i (G_V^+ G_A - G_A^+ G_V) (\vec{s}_n [\vec{p}_{\bar{\nu}}^0 \vec{p}_e^0]). \quad (20)$$

Для экспериментального обнаружения азимутальной асимметрии необходимо в плоскости, перпендикулярной спину нейтрона, поставить два счетчика для фиксирования импульсов одновременно появившихся электрона и антинейтрино; экспериментально значительно проще определять импульс не антинейтрино, а протона

$$\vec{p}_p = -\vec{p}_e - \vec{p}_{\bar{\nu}}.$$

Геометрически появление азимутальной асимметрии связано, так же как и появление полярной асимметрии (см. (16)), с различной ориентацией двух контуров. Один из этих контуров характеризует продольную поляризацию нейтрона (аксиальный вектор \vec{s}_n), а второй —

векторное произведение, построенное на импульсах антинейтрино $\vec{p}_{\bar{\nu}}$ и электрона \vec{p}_e , причем направление последнего контура определяется направлением -первого вектора p_{ν} (аксиальный вектор $[\vec{p}_{\bar{\nu}}^0, \vec{p}_e^0]$).

Наличие асимметричного члена ΔR , говорящего о комплексности коэффициентов связи G четырехфермионного взаимодействия, может быть наблюдеено экспериментально, если повернуть спин нейтрона на угол 180° . В этом случае взаимная ориентация контуров изменяется на противоположную, что должно привести к изменению знака у члена ΔR (рис. 13).

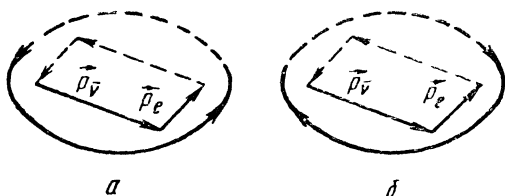


Рис. 13. Изменение азимутальной асимметрии при переворачивании спина нейтрона: *a* — круговая поляризация нейтрона до переворачивания спина; *b* — круговая поляризация нейтрона после переворачивания спина

Эксперименты, связанные с обнаружением этой тройной корреляции, должны носить весьма прецизионный характер и поэтому до настоящего времени существование этого члена еще точно не доказано, хотя эксперименты скорее показывают его отсутствие, т. е. вещественность коэффициентов G .

В случае распада антинейтрона мы должны согласно (18) в выражении (20) сделать замену $G \rightarrow G^+$, $\vec{s}_n \rightarrow \vec{s}_n^-$ и т. д., что изменит знак члена ΔR , т. е. выражение (20) не инвариантно относительно C -преобразования.

Однако мы покажем, что в теории поляризованного нейтрино полученные результаты должны всегда сохранять инвариантность относительно таких преобразова-

ний, которые переводят оператор нейтрино опять в оператор нейтрино*.

К числу подобных преобразований следует отнести преобразование инверсии пространства:

$$G \rightarrow G, \quad \vec{p} \rightarrow -\vec{p}, \quad \vec{s}^r \rightarrow \vec{s}^l \quad (21)$$

и преобразование слабого обращения времени $T' = CT$.

$$G \rightarrow G^+, \quad \vec{p} \rightarrow -\vec{p}, \quad \vec{s}^r \rightarrow -\vec{s}^r. \quad (22)$$

Нетрудно проверить, что все три конкретных результата (см. (16), (19), (20)), характеризующие несохранение четности, инвариантны относительно P - и T' -преобразований. Поэтому обобщение CPT -теоремы на случай поляризованного нейтрино можно представить в виде

$$PT' = CPT = \text{const}. \quad (23)$$

При анализе несохранения четности с помощью комбинированной инверсии Ландау—Ли—Янга в случае комплексности коэффициентов G CPT -теорема приводит к некоторым противоречивым результатам. В самом деле, несохранение четности, связанное с комплексностью коэффициентов G (см. (20)), дает соотношение (23). В то время как проявление несохранения четности благодаря учету поляризационных свойств нейтрино (см. (16) и (19)) должно привести к комбинированной инверсии вида:

$$P \neq \text{const}, \quad C \neq \text{const}, \quad PC = \text{const}, \\ T' = \text{const}, \quad (24)$$

благодаря чему обобщение CPT -теоремы на наличие спиральности принимает якобы вид

$$CPT' = \text{const}. \quad (25)$$

Поскольку преобразование (23) противоречит преобразованию (25), сторонники комбинированной инверсии считают, что выражение (20) следует положить равным нулю, или, как они говорят, должна отсутствовать вре-

* Заметим, что при одном C - или одном T -преобразовании оператор нейтрино превращается в оператор антинейтрино

менная неинвариантность Это возможно только в том случае, когда все коэффициенты G будут действительными.

По теории поляризованного нейтрино все три формулы (16), (19) и (20) являются следствием неинвариантности теории относительно C -преобразования*, т. е. перехода от частиц к античастицам, и остаются инвариантными при P -преобразовании, а также при T' -преобразовании. Поэтому согласно последней точке зрения коэффициенты G могут быть как действительными, так и комплексными. В самом деле, введение поляризации нейтрино, а также комплексности коэффициентов G будет удовлетворять одному и тому же условию (23). Отсутствие дополнительного члена (20) также не противоречит теории и будет указывать лишь на вещественность коэффициентов G .

Возможно, что с течением времени удастся найти явления асимметрии, связанные с комплексностью коэффициентов G .

Следует подчеркнуть, что открытие явлений несохранения четности позволило не только с качественной, но и с количественной стороны объяснить бета-распад и распад мезонов, хотя многие вопросы, связанные со слабым взаимодействием, остаются еще не выясненными.

§ 6. «ПОДКИДЫШИ», «СТРАННЫЕ ЧАСТИЦЫ» И «РЕЗОНЫ»

Как известно, Юкава предсказал существование квантов ядерного поля, которыми в дальнейшем оказались пи-мезоны. Однако ситуация с экспериментальным обнаружением этих частиц осложнилась благодаря тому обстоятельству, что вначале были обнаружены мю-мезоны, которые по ошибке и были приняты за кванты ядерного поля.

В пользу этого неправильного предположения свидетельствовала, например, масса мю-мезонов, равная $207m_0$, т. е. совпадающая с предсказанием Юкава. Однако на роль квантов ядерного поля мю-мезоны никак не могли претендовать, так как они не обеспечивали сильного взаимодействия с ядром. В самом деле, спин их ока-

* Это автоматически приводит к неинвариантности теории относительно T преобразования

зался равным $1/2$, и поэтому они, так же как и электроны, не могут без участия нейтрино поглощаться или испускаться ядром.

На сегодняшний день, когда уже открыты настоящие кванты ядерного поля (пи-мезоны), существование мю-мезонов пока не может быть оправдано. Поэтому теоретики в шутку их называют «подкидышами». Мю-мезон обладает сравнительно большим временем жизни (10^{-6} сек), так как распадается на три частицы: электрон (позитрон), и два антинейтрино (нейтрино). Поскольку мю-мезоны по своим свойствам напоминают электроны (спин, заряд, ядерная неактивность), они могут образовывать мю-мезоатомы, где основная роль, так же как и в обычном атоме, принадлежит электрическим силам. Вокруг ядра мезоатома вместо электрона вращаются отрицательные мю-мезоны. Поскольку масса мю-мезона более чем в 200 раз превышает массу электрона, радиус мю-мезоатома будет в $200 Z$ раз меньше радиуса атома водорода, где Z — порядковый номер элемента.

Особый интерес представляло исследование тяжелых мю-мезоатомов (с большим Z). Для них радиус орбиты находится уже внутри ядра, что позволило уточнить многие данные о распределении в нем заряда.

При определении лептонного заряда μ -мезонов учтем следующие экспериментальные факты: а) при распаде π^- -мезона вместе с правовинтовым μ^- -мезоном образуются правовинтовые нейтрино (или антинейтрино); б) мюонные правовинтовые нейтрино не тождественны правовинтовому электронному антинейтрино (при поглощении нуклонами быстрых мюонных нейтрино образуются только μ -мезоны, а не электроны).

Этим фактам можно удовлетворить, если для описания нейтрино взять четырехкомпонентную теорию, которая дает два типа решения (см. сноску на стр. 38). Если первый тип решения (нейтрино ν является левовинтовым, а антинейтрино $\bar{\nu}$ — правовинтовым) отнести к электронным нейтрино, то тогда второй тип решения (нейтрино ν' является правовинтовым, а антинейтрино $\bar{\nu}'$ — левовинтовым) следует отнести к мюонным нейтрино.

В этом случае распад π -мезонов будет происходить по схеме

$$\begin{aligned}\pi^- &\rightarrow \mu^- + \nu', \\ \pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}',\end{aligned}$$

причем в силу того, что μ -мезон и нейтрино разлетаются в противоположные стороны, спиральность μ -мезонов должна совпадать со спиральностью нейтрино.

Отсюда видно, что лептонный заряд μ^+ -мезона, так же как и электрона, равен плюс единице, а μ^- -мезона — минус единице. Благодаря этому, в частности, распад

$$\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$$

становится запрещенным.

Таким образом, открытие мюонного нейтрино естественно укладывается в рамки четырехкомпонентной теории и ограничивает применимость двухкомпонентной теории Ли—Янга—Ландау.

Следующим, чрезвычайно важным этапом в развитии учения об элементарных частицах было открытие странных частиц (ка-мезонов и гиперонов).

Странность их поведения проявляется в том, что процесс их распада идет по одной реакции, а процесс образования — по другой*.

Так, например, лямбда-гиперон (Λ — нейтральная частица) под действием слабого взаимодействия (со временем жизни 10^{-10} сек) распадается на протон (p) и π^- -мезон. Обратное при столкновении протона с отрицательным пи-мезоном один лямбда-гиперон образоваться не может, т. е. процесс распада странных частиц и процесс их образования являются необратимыми. Лямбда-гиперон всегда образуется вместе с другой странной частицей, например K^0 -мезоном, причем процесс образования характеризуется временем порядка 10^{-23} сек, т. е.

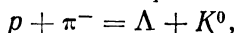
* Как известно, время протекания различных процессов пропорционально соответствующему квадрату константы взаимодействия. Обозначая квадраты констант сильного, электромагнитного и слабого взаимодействия через g^2 , e^2 и f^2 , имеем для их отношения следующие значения: $g^2 : e^2 : f^2 = 1 : 10^{-3} : 10^{-15}$. Поэтому если время превращения элементарных частиц под действием сильного взаимодействия (например, поглощения протоном пи-мезонов) имеет порядок 10^{-23} сек, то время реакций под действием электромагнитного взаимодействия будет, как правило, примерно в 1000 раз больше. Время же протекания реакций, обусловленных слабым взаимодействием (например, распад пи-мезона), будет иметь порядок $10^{-8} - 10^{-10}$ сек.

обусловлен сильным взаимодействием. Таким образом, странные частицы всегда рождаются совместно, парами (сильное взаимодействие), а распадаются поодиночке.

Для объяснения процессов рождения была введена новая характеристика элементарных частиц, получившая название странности, которая обозначается буквой S .

Эта величина должна сохраняться в процессах, обусловленных сильным взаимодействием, например при образовании гиперонов.

Для того чтобы объяснить реакцию



возникающую под действием сильного взаимодействия $\Sigma S = \text{const}$, необходимо было странность K^0 -мезона положить равной плюс единице ($S = +1$), а лямбда-гиперона — минус единице ($S = -1$). При распаде же странных частиц (слабые взаимодействия) странность может измениться на единицу ($\Delta S = \pm 1$), например, в реакции распада $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ странность лямбда-гиперона равна минус единице, а для протона и для пи-мезона она равна нулю.

Весьма важным в изучении гиперонов оказалось экспериментальное открытие гипер-ядер, у которых, например, один из нейтронов заменен лямбда-гипероном. Система $p + \Lambda$ (т. е. лямбда-дейтрон ${}_{\Lambda}\text{H}^2$) не существует. Это говорит о том, что силы взаимодействия между p и Λ несколько слабее, чем между p и n , но имеют тот же порядок, поскольку могут образовываться следующие гипер-ядра:



и т. д. вплоть до самых тяжелых. Время жизни гипер-ядер примерно совпадает со временем жизни лямбда-гиперона (10^{-10} сек).

Существование гипер-ядер еще раз подчеркивает общность нуклонов и гиперонов и оправдывает включение их в единую группу барионов с одинаковым значением барионного числа $B = 1$.

Классификацию сильно взаимодействующих частиц (пи-мезоны, нуклоны, странные частицы) Гелл-Манн и независимо от него Нишиджима в 1955 г. предложили производить с помощью следующей формулы:

$$Q = I_3 + \frac{B + S}{2},$$

где Q — электрический заряд частиц, выраженный в единицах e_0 , I_3 — проекция изотопического спина, B — барионное число, S — странность.

Для первой группы бозонов, а именно пи-мезонов, $S = 0$ и $I = 1$. Поэтому для них мы имеем зарядовый триплет, причем величина электрического заряда совпадает с проекцией изотопического спина:

$$Q = I_3,$$

поскольку $I_3 = +1, 0, -1$ соответственно относится к π^+ , π^0 - и π^- -мезонам.

Распад заряженных пи-мезонов происходит под действием слабого взаимодействия и поэтому время жизни его имеет порядок 10^{-8} сек. Нейтральный мезон распадается под действием электромагнитного взаимодействия $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ и поэтому время жизни для него значительно меньше (10^{-16} сек).

Для второй группы бозонов — ка-мезонов следует в формуле Гелл-Манна и Нишиджима положить $I_3 = \pm 1/2$ (дублеты), $B = 0$, $S = \pm 1$. Поэтому должно существовать четыре K -мезона.

Для K^+ -мезона:

$$S = 1 \quad \text{и} \quad I_3 = \frac{1}{2},$$

для K^0 -мезона:

$$S = 1 \quad \text{и} \quad I_3 = -\frac{1}{2}.$$

В случае

$$S = -1 \quad \text{и} \quad I_3 = \pm \frac{1}{2}$$

мы будем иметь соответствующие античастицы

$$\bar{K}^0 \quad \text{и} \quad \bar{K}^+ = K^-.$$

Если K^- -антимезон отличается от K^+ -мезона не только странностью, но и знаком электрического заряда, то \bar{K}^0 -антимезон отличается от K^0 -мезона только странностью, что весьма существенно при рождении этих частиц, когда странность должна сохраняться.

K^+ -мезон может распадаться как на два, так и на три пи-мезона. Долгое время считали, что это разные частицы. Первую назвали тау-мезон (τ), вторую — тета-мезон (θ). Сейчас мы знаем, что это один и тот же тип частиц.

Проблема разрешения загадки «тау-тета» послужило началом работ по несохранению четности, однако до сих пор эта загадка окончательно еще не разрешена.

Точно так же два нейтральных ка-мезона (K^0 и \bar{K}^0), могут существовать лишь в определенной смеси друг с другом, содержащей те и другие частицы в равной пропорции.

Суперпозиция этих нейтральных мезонов образует в свою очередь два состояния K_1^0 -мезон и K_2^0 -мезон, причем существование K_2^0 -мезона было предсказано на основе схемы странных частиц.

Основное отличие этих нейтральных мезонов заключается в их типе распадов.

K_1^0 -мезон распадается на два пи-мезона со временем жизни 10^{-10} сек, а K_2^0 -мезон — на три пи-мезона со временем жизни 10^{-7} сек. В этом отношении K_1^0 -мезон до некоторой степени напоминает собой парапозитроний (распадающийся на 2γ), а K_2^0 — ортопозитроний (распадающийся на 3γ).

Таким образом, нейтральные ка-мезоны различаются между собой по одному признаку при рождении, а по другому — при распаде.

Если в группе бозонов разделение на частицы и античастицы не носит резкого характера, так как для них $B=0$, то в группе тяжелых фермионов (барионы) разделение на частицы и античастицы имеет резкую границу и характеризуется различным значением барионного числа B (для частиц $B=1$; для античастиц $B=-1$).

Все частицы группы барионов также могут быть получены из формул Гелл-Манна и Нишиджимы.

Для нуклонов $I=1/2$ (дублеты) и $S=0$. Всего будет две пары дублетов с $B=1$ (нуклоны) и $B=-1$ (анти-нуклоны).

Для гиперонов возможны:

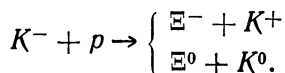
а) пара нейтральных синглетов ($I=0$), отличающихся друг от друга значением странности и нуклонного

заряда: для лямбда-гиперона $B=1, S=-1$; для анти-лямбда-гиперона $B=-1, S=1$;

б) пара триплетов ($I=1, B=1, S=-1$ — один триплет и $I=1, B=-1, S=1$ — другой триплет), связующих в единое семейство так называемые сигма-гипероны и

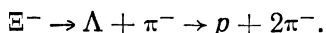
в) пара дублетов ($I=1/2, B=1, S=-2$ и $I=1/2, B=-1, S=2$), образующих так называемые каскадные кси-гипероны.

Поскольку странность кси-гиперонов равняется минус двум, то они могут рождаться при столкновении протона с отрицательным ка-мезоном, странность которого уже равняется минус единице:



В этой реакции наряду с сохранением барионного числа должен иметь место закон сохранения странности (сильное взаимодействие).

Поскольку при распаде странных частиц странность изменяется на единицу, кси-гиперон превращается в нуклон в два этапа (т. е. через промежуточный каскад):



Таким образом, введение странности и барионного числа делает возможной классификацию сильно взаимодействующих частиц. Эта классификация, данная Гелл-Манном и Нишиджимой представлена в табл. 2.

Определив странность S , можно найти зарядовую мультиплетность и тем самым число частиц, образующих данные семейства. Конечно, при этом надо еще учитывать, что наряду с частицами должны существовать античастицы, обладающие не только противоположным электрическим зарядом, но и противоположным барионным числом и странностью. Таким образом, Гелл-Манн и Нишиджима предсказали ряд частиц, которые приведены в табл. 2.

Существование еще не открытого анти-кси-нуль-гиперона не вызывает никаких сомнений. Более того, можно точно предсказать величину его основных характеристик: массы, заряда, странности и т. д.

Вопрос о синглетном бозоне, так называемом π_0^0 -мезоне, существование которого не противоречит таблице

Сильно взаимодействующие частицы по Гелл-Манну и Нишиджиме

Странность S части- цы	античасти- цы	Зарядовая мультиплетность	Q=1	Q=0	Q=-1	Q=0	Q=1	Q=0	Q=-1
			Бозоны B=0						
0	0	синглет I=0 I_3				** π_0^0 0			
0	0	триплет I=1 I_3			π^- -1	π^0 0	π^+ +1		
1	-1	дублеты I=1/2 I_3	K^+ 1/2	K^0 -1/2				* \bar{K}^0 1/2	K^- -1/2
			Барыоны B=1			Антибарыоны B=-1			
0	0	дублеты I=1/2 I_3	p 1/2	n -1/2				* \bar{n} 1/2	* \bar{p} -1/2
-1	1	синглеты I=0 I_3		Λ 0				* $\bar{\Lambda}$ 0	
-1	1	триплеты I=1 I_3	Σ^+ 1	* Σ^0 0	Σ^- -1		* $\bar{\Sigma}^-$ -1	* $\bar{\Sigma}^0$ 0	* $\bar{\Sigma}^+$ -1
-2	2	дублеты I=1/2 I_3		* Ξ^0 1/2	Ξ^- -1/2		* $\bar{\Xi}^-$ 1/2	** $\bar{\Xi}^0$ -1/2	

В основе классификации лежит формула

$$Q = I_3 + \frac{B+S}{2},$$

где Q—электрический заряд (в единицах e_0), I—изоспин, I_3 —компонента изоспина, B—барыонное число, S—странность. Звездочкой указаны элементарные частицы, существование которых предсказывалось теорией, причем одна звездочка означает, что частица после предсказания уже обнаружена экспериментально, а двумя звездочками—еще не обнаружена.

Гелл-Манна и Нишиджимы, является далеко еще не выясненным.

В таблицу Гелл-Манна и Нишиджимы не входят легкие фермионы (электрон, мю-мезон, нейтрино и т. д.) и фотон, которые мы поместили в табл. 3.

Таблица 3 -

Легкие элементарные частицы (лептоны)

Взаимодействие	Мюонное	Электронное		Электронное	Мюонное
Лептонный заряд →	+1 частицы		0	-1 античастицы	
Фотон			γ		
Нейтрино	ν' (прав.)	ν (лев.)		$\bar{\nu}$ (прав.)	$\bar{\nu}'$ (лев.)
Электроны		e^-		e^+	
Мю-мезоны	μ^+				μ^-

Для характеристики легких частиц не надо вводить изотопического спина, странности и барионного числа, что определяет положение частицы в схеме Гелл-Манна и Нишиджимы, и поэтому легкие частицы в эту схему лучше не включать. С другой стороны, помимо электрического заряда они характеризуются еще лептонным зарядом, равным для сильно взаимодействующих частиц нулю.

Все открытые на сегодняшний день (или с достоверностью предсказываемые) элементарные частицы представлены в табл. 4.

По-видимому, должен существовать еще один бозон, а именно гравитон, который также должен быть включен в будущую более общую схему элементарных частиц. Согласно гипотезе Д. Д. Иваненко, гравитоны могут превращаться в пары электрон—позитрон, нейтрино—антинейтрино и другие частицы. Экспериментальное существование гравитона будет окончательно доказано, если будут обнаружены гравитационные волны. Таким образом, проблема обнаружения гравитационных волн

Элементарные частицы

Класс и спин	Символ	Знак заряда	Название	Масса		Реакция образования	Схема распада	Время жизни, сек
				$M_{эв}$	m_0			
Бозон $s = 1$	γ	0	фотон	0	0		стабилен	∞
Лептоны $s = 1/2$	ν, ν'	0	нейтрино антинейтрино	0	0		стабильны	∞
	$\bar{\nu}, \bar{\nu}'$	0		электрон позитрон	0,51	1	$\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$	стабильны
Мезоны	μ^-	-	мю-минус мю-плюс*	106	207		$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}' + \bar{\nu}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$
	π^+	+						
Бозоны, $s = 0$	π^0	0	пи-нуль пи-минус пи-плюс	135	264	$p + p \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} p + n + \pi^+ \\ p + p + \pi^0 \end{array} \right.$	$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$	$2,3 \cdot 10^{-16}$
	π^-	-				$p + \bar{p} \rightarrow 5\pi$	$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu'$	$2,6 \cdot 10^{-8}$
	K^+	+	ка-плюс ка-минус	494	967		$K^+ \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \pi^+ + \pi^+ + \pi^- \\ \pi^+ + \pi^0 \end{array} \right.$	$1,2 \cdot 10^{-8}$
	K^-	-					$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$
	\bar{K}^0	0	ка-нуль анти-ка-нуль	498	974	$\pi^- + p \rightarrow K^- + K^0 + p$	$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$	$0,6 \cdot 10^{-7}$
K^0	0							

* Мы не приводим здесь схемы распада античастицы. Для того чтобы от реакции распада частиц перейти к схеме распада античастиц, мы должны все частицы заменить на соответствующие античастицы.

Продолжение таблицы 4

Класс и спин	Символ	Знак заряда	Название	Масса		Реакция образования	Схема распада	Время жизни, сек		
				Мэв	m_0					
нуклоны	$\frac{p}{p}$	+	протон	938,2	1836,1		стабильны	1,0·10 ³		
	$\frac{n}{n}$	0	нейтрон	939,5	1838,6					
гипероны	Λ	0	лямбда анти-лямбда	1115	2183	$\pi^+ + n \rightarrow \Lambda$	$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$	2,5·10 ⁻¹⁰		
	$\bar{\Lambda}$	0		$\pi^+ + p \rightarrow \Sigma^+ + K^+$						
	Σ^+	+	сигма-плюс анти-сигма-плюс	1189	2328	$\pi^- + p \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \Sigma^0 + K^0 \\ \Sigma^- + K^+ \end{array} \right.$	$\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$	0,8·10 ⁻¹⁰		
	Σ^0	0		$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda + \gamma$				$\left\{ \begin{array}{l} 10^{-11} \text{ эксп.} \\ 10^{-19} \text{ теор.} \end{array} \right.$		
	Σ^-	-	сигма-минус анти-сигма-минус	1192	2332		$\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$	1,6·10 ⁻¹⁰		
	$\bar{\Sigma}^-$	+		1196	2341					
	каскадные гипероны	Ξ^0	0	кси-нуль анти-кси-нуль**	1311	2566	$K^- + p \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \Xi^0 + K^0 \\ \Xi^- + K^+ \end{array} \right.$	$\Xi^0 \rightarrow \Lambda + \pi^0$	1,5·10 ⁻¹⁰	
		Ξ^-	0		1318	2580		$\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$	1,3·10 ⁻¹⁰	
		Ξ^+	+	кси-плюс анти-кси-плюс						
		Ξ^0	0							

Барьоны, $s = 1/2$

** Эта частица еще не обнаружена экспериментально.

уже поставлена на повестку дня и представляет собой одну из важнейших проблем современности*.

Одной из центральных задач является создание общей теории элементарных частиц, в особенности плохо еще разработанной теории сильных взаимодействий, где, по-видимому, отдельные частицы сильно связаны с вакуумом.

В самом деле, если вакуумный магнитный момент электрона примерно в тысячу раз меньше дираковского, то для протона он оказывается больше дираковского примерно в два раза.

Анализируя опыты Хофштадтера и Вильсона по рассеянию нуклонами быстрых электронов, мы пришли к выводу, что пи-мезоны, окружающие нуклон, находятся в столь возбужденном состоянии, что пи-мезонное облако представляет собой нечто среднее между реальным состоянием, напоминающим электрон в атоме, и виртуальным состоянием, обуславливающим, например, поляризацию вакуума.

Значительный интерес в развитии всех этих вопросов представляют также недавно открытые в области больших энергий (несколько сот мегаэлектронвольт) резонансные состояния в системе сильно взаимодействующих частиц («резонаны»), которые образуют собой какие-то короткоживущие метастабильные соединения.

«Резонаны» были открыты при исследовании взаимодействия частиц с большими энергиями, получаемых, как правило, на ускорителях.

Подобные «резонаны» были уже нами рассмотрены при рассеянии пи-мезонов нуклонами (см. рис. 7 и 8). Там они проявляются в виде пиков. Эти резонансы можно связать с нуклонными «резонанами». Кроме нуклонных «резонансов» в настоящее время открыты еще пи-«резонаны», ка-«резонаны» и гиперонные «резонаны». Основные «резонаны» приведены в табл. 5, где даны также некоторые возможные схемы их образования и распад.

«Резонаны» нельзя считать новыми элементарными частицами, так как они обладают сравнительно боль-

* Возможно, что гравитационное поле сыграет известную роль при определении внутренних свойств элементарных частиц.

шой шириной резонанса. Точно так же положительная энергия взаимодействия не позволяет их рассматривать как атомоподобные соединения. По-видимому, они представляют собой какой-то новый вид слияния элементарных частиц.

Следует также подчеркнуть, что за последнее время было сделано много попыток рассматривать некоторые элементарные частицы (в первую очередь бозоны) как соединение других так называемых фундаментальных элементарных частиц. Так, например, в свое время разрабатывалась нейтринная теория света, согласно которой фотон представляет собой своеобразное слияние нейтрино и антинейтрино.

Поскольку мы имеем мало экспериментальных данных о структуре лептонов, в настоящее время исследование ведутся главным образом по теории слияния сильно взаимодействующих частиц. Наибольший интерес в развитии этого направления представляет собой модель Саката, согласно которой все сильно взаимодействующие частицы состоят из нуклонов (обладающих Q и B) и лямбда-гиперонов (обладающих B и S). Затем Саката ввел предположение, что между любыми из фундаментальных барионов (p, n, Λ) и любым фундаментальным антибарионом ($\bar{p}, \bar{n}, \bar{\Lambda}$) на малых расстояниях ($\sim 10^{-14}$ см) существует притяжение, в то время как между двумя фундаментальными барионами (или антибарионами) должно действовать отталкивание. Притягиваясь друг к другу, барионы и антибарионы образуют пи-мезоны либо ка-мезоны.

Так, комбинация нуклона и антинуклона может образовать триплетное семейство пи-мезонов:

$$\pi^+ = p\bar{n}, \quad \pi^- = \bar{p}n, \quad \pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(p\bar{p} - n\bar{n}).$$

Комбинация же нуклона и анти-лямбда-гиперона (или антинуклона и лямбда-гиперона) дает два дублета семейства ка-мезонов:

$$1) K^+ = p\bar{\Lambda}, \quad K^0 = n\bar{\Lambda}; \quad 2) K^- = \bar{p}\Lambda, \quad \bar{K}^0 = \bar{n}\Lambda.$$

По этой схеме не только бозоны, но и сигма-кси-гипероны, относящиеся также к схеме сильно взаимодействующих частиц, являются сложными. Так, например,

Основные «резонансы»

Наименование	Символ	Изоспин	Спин	Масса, $M_{\text{Мэв}}$	Полуши- рина резонанса	Возможная схема образования	Возможная схема распада
Пи-«резонансы» $S = 0; B = 0$	ρ	1	1	755	50	$\pi + N \rightarrow N + \rho$	$\rho \rightarrow 2\pi$
	ζ	1	целый	600	15		$\zeta \rightarrow 2\pi$
	ω	0	1	785	12	$\bar{N} + N \rightarrow \omega + 2\pi$	$\omega \rightarrow 3\pi$
	η	0	0	-550	8	$\pi^+ + N^2 \rightarrow \omega + 2\rho$	$\eta \rightarrow 3\pi$ $\eta \rightarrow 2\gamma$
Ка-«резонансы» $S = 1;$ $B = 0$	K^*	1/2	1	885	12	$K + N \rightarrow K^* + N$	$K^* \rightarrow K + \pi$
	Нуклонные «резонансы» $S = 0; B = 1$	3/2 1/2 1/2 3/2	3/2 3/2 5/2 3/2	1238 1510 1680 1900	45 30 50 100	$\gamma + N \rightarrow N^*$ $\pi + N \rightarrow N^*$	$N^* \rightarrow N + \pi$
Гиперонные «резонансы» $S = -1;$ $B = 1$	Y_1^*	1	3/2	1385	25	$K + N \rightarrow Y_1^* + \pi$	$Y_1^* \rightarrow \Lambda + \pi$
	Y_0^*	0	3/2	1405	20		$Y_0^* \rightarrow \Sigma + \pi$
	Y_0^{**}	0	полуцелый	1520	8		
	Y_0^{***}	0	полуцелый	1815	60		$Y_0^{***} \rightarrow \Lambda + 2\pi$

Массы указаны в системе центра инерции. Здесь N — нуклон, т. е. протон или нейтрон, а \bar{N} — антинуклон. Время жизни «резонансов» равно 10^{-20} — 10^{-22} сек, т. е. оно много меньше времени жизни элементарных частиц. Нуклонные «резонансы» проявляются также в виде пиков при рассеянии пи-мезонов нуклонами. В частности, резонанс в системе, где протон покоится, равный кинетической энергии пи-мезонов в 180 Мэв (см. рис. 7 и 8), соответствует (в системе центра инерции) общей энергии в 1238 Мэв, т. е. N^* «резонансу». Точно доказано существование только тех «резонансов», у которых указан цифрами спин.

сигма-гипероны должны состоять из нуклона, антинуклона и лямбда-гиперона:

$$\Sigma^+ = p\bar{n}\Lambda, \quad \Sigma^- = \bar{p}n\Lambda, \quad \Sigma^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(p\bar{p} - n\bar{n})\Lambda \text{ и т. д.}$$

Аналогично

$$\Xi^- = \bar{p}\Lambda\Lambda, \quad \Xi^0 = \bar{n}\Lambda\Lambda \text{ и т. д.}$$

Одним из важных следствий модели Саката является то, что наряду с образованием указанных сложных «долгоживущих» частиц (время жизни $10^{-8} - 10^{-16}$ сек), для которых масса должна быть меньше суммы масс отдельных частиц (поскольку большая энергия связи «съедает» часть массы), возможно также образование «резонансов» (квaziчастиц), масса которых превышает суммарную массу отдельных частиц, благодаря чему они являются малоустойчивыми и обладают временем жизни порядка 10^{-22} сек. Следует подчеркнуть, что схема Саката не полностью апробирована и носит фактически кинематический характер, поскольку она не определяет физической природы взаимодействия элементарных частиц.

Поэтому перед учеными поставлена задача создания такой теории сильной связи, которая прежде всего дала бы спектр масс элементарных частиц. Возможно, что исследование спектра масс позволило бы объяснить закономерности сильно взаимодействующих частиц подобно тому, как анализ оптических спектров атомов привел в свое время к квантовой механике.

Установление спектра «резонансов» (энергии, спина, изоспина, четности и т. д.) является также одной из первостепенных задач теории сильного взаимодействия.

Создаваемые за последнее время динамические квантовые теории сильной связи, которые носят еще сугубо предварительный характер, можно в первом приближении разбить на полевые и феноменологические.

Из полевых теорий следует прежде всего отметить нелинейное волновое уравнение Иваненко — Гейзенберга, из которого были получены некоторые качественные результаты, например, спектр масс сильно взаимодействующих частиц. Полевые методы исследования начал развивать также Швингер. Известного успеха удалось добиться с помощью обычных дисперсионных соотноше-

ний (Гольдбергер, Боголюбов и др.) и в особенности двойных (Мандельстам, Чу и др.). В последних работах, которые скорее можно отнести к феноменологическим, исходя из ряда общих принципов (причинность, унитарность и т. д.), были установлены некоторые качественные результаты без введения каких-либо конкретных полевых взаимодействий между частицами*.

Наконец, в самое последнее время были получены весьма важные результаты в теории сильной связи, исходя из полюсов Рэджа. Теория Рэджа представляет собой дальнейшее развитие потенциального рассеяния обычной квантовой механики. В ней показано, что в теории потенциального рассеяния полюса могут лежать не только на вещественной оси, но и в комплексной плоскости орбитального момента количества движения.

В частности, применяя эту теорию к сильно взаимодействующим частицам, можно показать, что образование «резонансов» должно соответствовать случаю, когда полюса в потенциальном рассеянии лежат в комплексной плоскости орбитального момента.

Таким образом, появились некоторые основания надеяться, что и теория сильной связи будет все же в ближайшее время построена.

Анализируя перспективу развития учения об элементарных частицах, следует заметить, что хотя ряд новых частиц был открыт в космических лучах — позитрон (Андерсен, 1932), мю-мезоны (Неддермайер и Андерсен, 1937), пи-мезоны (Пауэлл, 1947), некоторые ка-мезоны (Лепренс-Ренге, О'Силлэг и др. 1942—1947), некоторые гипероны (Рочестер и Батлер, 1947), однако основные исследования с элементарными частицами удалось произвести только после постройки мощных ускорителей.

Так, например, на протонных ускорителях «Космотрон» на 3,5 Бэв, «Беватрон» на 6,5 Бэв (США) и синхротрон на 10 Бэв (г. Дубна, СССР) были получены монохроматические потоки пи-мезонов, ка-мезонов, ги-

* Возможно, что с помощью полевых методов удастся обосновать ряд выводов, получаемых из дисперсионных соотношений. В связи с этим мы возлагаем большие надежды на теорию затухания, где автоматически выполняются принципы причинности и унитарности

перонов, а также открыты новые частицы антипротоны, антинейтроны (Сегре, Чемберлен и др., 1955), семейства гиперонов и антигиперонов. Недавно запущенные в Женеве (Швейцария) и в Брукхейвене (США) ускорители (примерно на 30 *Бэв*) позволили получить весьма интенсивный пучок антипротонов. Только что получены сообщения об открытии на этих мощных ускорителях *анти-кси-минус-гиперона*, а также мюонного нейтрино (Ледерман, Стейнбергер и др.), предсказанного Б. М. Понтекорво. В настоящее время у нас в СССР строятся еще более мощные протонные ускорители на энергии порядка 70 *Бэв*.

Как известно, ученые смогли разглядеть многие детали Вселенной лишь после того, как был построен телескоп. В микромире подобным «телескопом» может служить ускоритель. Быстрый поток, создаваемый из заряженных частиц, может быть использован для простреливания других элементарных частиц, что дает опытные данные об их структуре. Чем более мощные будут ускорители, тем большие детали в элементарных частицах удастся «разглядеть».

Следует подчеркнуть, что в развитии учения об элементарных частицах особую роль должны сыграть и электронные ускорители. В самом деле, быстрые электроны, являясь ядернонеактивными частицами, сравнительно легко пронизывают нуклоны и дают сведения о многих деталях их внутренней структуры, которую никак нельзя «разглядеть» с помощью более мощных протонных ускорителей.

В связи с этим напомним, что на ныне действующих сравнительно небольших электронных ускорителях с энергией порядка 1 *Бэв* уже была обнаружена электромагнитная структура нуклона (опыты Хофштадтера и Вильсона). В настоящее время входит в строй электронный ускоритель с энергией 6 *Бэв* при Гарвардском университете (США), который должен помочь познать еще более тонкие детали структуры нуклона. При постройке циклических электронных ускорителей следует учитывать большие потери вследствие синхротронного излучения (см. работы Д. Д. Иваненко и И. Я. Померанчука, Л. А. Арцимовича, А. А. Соколова), которое практически отсутствует в протонных ускорителях. Максимум синхротронного излучения приходится на очень высо-

кие гармоники, благодаря чему, как мы уже указывали, оно приводит при сравнительно больших энергиях к флуктуационному характеру излучения, что в свою очередь дает квантовое возбуждение бетатронных колебаний (см. работы А. А. Соколова, И. М. Тернова, А. А. Коломенского и др.). Эти квантовые флуктуации были обнаружены экспериментально Ф. А. Королевым (СССР), а также М. Сэндсом (США). Благодаря синхротронному излучению постройка циклических электронных ускорителей с энергией, превышающей несколько *Бэв*, вызывает большие затруднения, и поэтому ученые начали строить и разрабатывать линейные электронные ускорители, а также искать пути борьбы с квантовыми флуктуациями.

Отметим также, что относительная энергия может быть сильно увеличена, если построить ускорители на встречных пучках.

Как было уже указано, в лаборатории во Фраскати (около Рима) построены первые накопители быстрых электронов и позитронов с энергией 300 *Мэв*. Там имеется реальная возможность поставить опыты по рассеянию электронов на встречном пучке электронов или позитронов и получить сведения об их структуре.

Постройка мощного ускорителя продолжается примерно 5—10 лет и требует мобилизации многих отраслей народного хозяйства и в первую очередь развития радиоэлектроники и технического совершенствования вычислительных, управляющих и информационных машин, что предусмотрено грандиозной Программой нашей партии, утвержденной XXII съездом КПСС.

На сессии Академии наук СССР в феврале 1962 г. специально обсуждался вопрос о новом принципе ускорения протонов, получившем название автокоррекции. Этот принцип разработан советскими учеными Э. Л. Бурштейном, А. А. Васильевым, А. Л. Минцем, В. А. Петуховым и С. М. Рубчинским.

Как известно, чем больше энергия ускорителя, тем большее расстояние в процессе ускорения приходится проходить частицам. Так, например, в протонных ускорителях с жесткой фокусировкой с энергией порядка 30 *Бэв* протон, движущийся по круговой траектории, покрывает путь, равный примерно расстоянию от Земли до Луны. При этом, чтобы удержаться в цикле ускоре-

ния, пучок не может отклониться от рассчитанной траектории более чем на один или два сантиметра. В противном случае он выходит из цикла ускорения. Во всех современных ускорителях всякие возможные отклонения от траектории должны быть заранее учтены, так как после запуска ускорителя изменение электромагнитного поля происходит независимо от движения пучка. При новом способе ускорения (автокоррекция) предусматривается еще местное автоматическое регулирование характеристик магнитного поля по информации положения пучка, что может выправить его случайные отклонения. Этот метод, согласно расчетам советских авторов, позволяет построить ускорители протонов (кибернетический ускоритель) с энергией до 300—1000 *Бэв*.

Если построить на такую энергию не один, а два ускорителя и произвести столкновения этих пучков, то тогда энергия одного протона относительно встречного может увеличиться до 10^{15} *эв*. Эта цифра является пока теоретическим пределом, который в принципе может быть сегодня достигнут искусственно для тяжелых частиц в земных условиях. В космических лучах уже наблюдались частицы (правда, единичные случаи) с энергией 10^{19} *эв*. Однако одинокие космические частицы со столь большой энергией мало что могут дать для исследования структуры элементарных частиц, так как для этой цели надо иметь еще достаточную интенсивность пучка.

ЛИТЕРАТУРА.

Гелл-Манн М., Розенбаум Е. Элементарные частицы. УФН, 64, 391, 1958.

Иваненко Д. Д., Старцев А. А. Классификация элементарных частиц. УФН, 72, 765, 1960.

Сноу Г., Шапиро М. Мезоны и гипероны. УФН, 74, 125, 1961.

Блохинцев Д. И., Барашенков В. С., Барбашев Б. М. Структура нуклонов. УФН, 68, 417, 1959.

Дрелл С., Захариазен Ф. Электромагнитная структура нуклонов. ИЛ, М., 1962.

Бор Н. Единство человеческого знания. «Техника молодежи», № 8, 1961.

Соколов А. А. и Туманов В. С. Соотношение неопределенности и теория флуктуаций. ЖЭТФ, 30, 802, 1956.

Соколов А. А., Тернов И. М. К квантовой теории светящегося электрона. ЖЭТФ, 25, 698, 1953.

- Korolev F. с сотр. Nuovo Cimento, 18, 4257, 1960.
Понтекорво Б. М. Неуловимое нейтрино. «Знание — сила»,
№ 2, 1961; Электронные и мюонные нейтрино. ЖЭТФ, 37, 1751, 1959.
Sokolov A. A., Kerimov B. K. Ann. Phys., 2, 46, 1958.
Соколов А. А. Введение в квантовую электродинамику.
Физматгиз, М., 1958.
Соколов А. А. Некоторые методологические вопросы теории несохранения четности. «Вопросы философии», № 10, 1959.
Соколов А. А., Колесникова М. М. О рассеянии поперечно поляризованных фермионов. ЖЭТФ, 38, 1778, 1960.
Sokolov A. A. Ann. d. Phys., 8, 237, 1961.
Боголюбов Н. Н., Медведев Б. М., Поливанов М. К. Вопросы теории дисперсных соотношений. Физматгиз, М., 1958.
Соколов А. А., Керимов Б. К. К теории рассеяния дираковских частиц с учетом затухания. ДАН СССР, 105, 961, 1955.
Иваненко Д. Д., Соколов А. А. Классическая теория поля. Физматгиз, М., 1951.
Бурштейн Э. Л., Васильев А. А., Минц А. Л., Петухов В. А., Рубчинский С. М. Применение принципа автокоррекции поля в циклических ускорителях на сверхвысокие энергии. «Атомная энергия», 12, 111, 1962.
Lederman L., Steinberger J. и др. Phys. Rev. Letters, 9, 36, 1962.

Арсений Александрович Соколов

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Редактор *Г. С. Гольденберг*

Технич. редактор *М. С. Ермаков*

Корректоры *Г. Д. Шишкова* и *З. И. Ралдугина*

Сдано в набор 2/VIII 1962 г. Подписано к печати 3/I 1963 г.
Л-57003. Формат 84×108^{1/32}. Печ. л. 2,125. Привед. печ. л. 3,57.
Уч.-изд. л. 3,47. Изд. № 311. Заказ 189. Тираж 9500. Цена 10 коп.

Издательство Московского университета
Москва, Ленинские горы, Административный корпус
Типография Изд-ва МГУ. Москва, Ленинские горы