

равной степени элементарны». Мы не находим среди них частиц, которые казались бы «составными». Тем не менее некоторые физики предполагают, что существуют еще более элементарные образования.

Гелл-Манн предположил, что мезоны и барионы являются сложными системами, образованными еще не открытыми частицами, которые он назвал *кварками*. Такую гипотезу нельзя считать безосновательной. Гелл-Манн заметил, что некоторые свойства мезонов и барионов и, в частности, принципы симметрии, управляющие взаимодействиями этих частиц, могут получить эстетически привлекательное объяснение, если кварки (и антикварки) существуют. Согласно идеям Гелл-Манна, заряд кварков должен быть равен  $\pm e/3$  и  $\pm 2e/3$  ( $e$  — элементарный заряд), и этим они сильно отличаются от всех известных частиц. Диаграмма симметрии кварков показана на рис. 31А.

Все поиски кварков до сих пор не привели к положительному результату. Кварки должны быть значительно тяжелее нуклонов, в противном случае они были бы обнаружены в опытах на ускорителях. Можно поэтому думать, что если нуклон действительно является связанным состоянием (трех) кварков, то энергия связи такого состояния должна быть очень велика по сравнению с массой нуклона. Нуклон должен быть, таким образом, очень сильно связанной системой, и в этом смысле он радикально отличался бы от других известных нам связанных систем, а именно от атомов, молекул и даже ядер. (Энергии связи всех этих систем *малы* по сравнению с массой системы.) Поэтому можно думать, что если когда-нибудь будет установлена составная природа нуклона, то он окажется составным совсем не в том смысле, в каком составной является, например, такая частица, как дейтрон.

### Основные идеи квантовой теории поля

32. Рассмотрим теперь некоторые теоретические попытки понять взаимодействие частиц. Вернемся к идее, высказанной в п. 9, согласно которой рассеяние следует рассматривать как проявление взаимодействия волны с волной. Классической идее о двух частицах, взаимодействующих с помощью сил, соответствует квантовомеханическая идея о взаимодействии волн де Бройля. Это означает, что волна де Бройля одной из частиц влияет на распространение волны де Бройля *другой* частицы. Такое влияние возможно лишь в том случае, если среда, в которой распространяются волны де Бройля, нелинейна, т. е. если «отклик» среды нелинеен.

В линейной среде, где распространение волн описывается линейным дифференциальным уравнением, любая линейная суперпозиция двух волн дает возможную волну, и присутствие одной волны не влияет на поведение другой.

33. Обсудим теперь свойства *вакуума*, или пустого пространства. В XIX веке, когда развивалась электромагнитная теория, вакуум был известен под другим наименованием. Его называли «эфиром». Рассуждая о волне, естественно поставить вопрос о том,

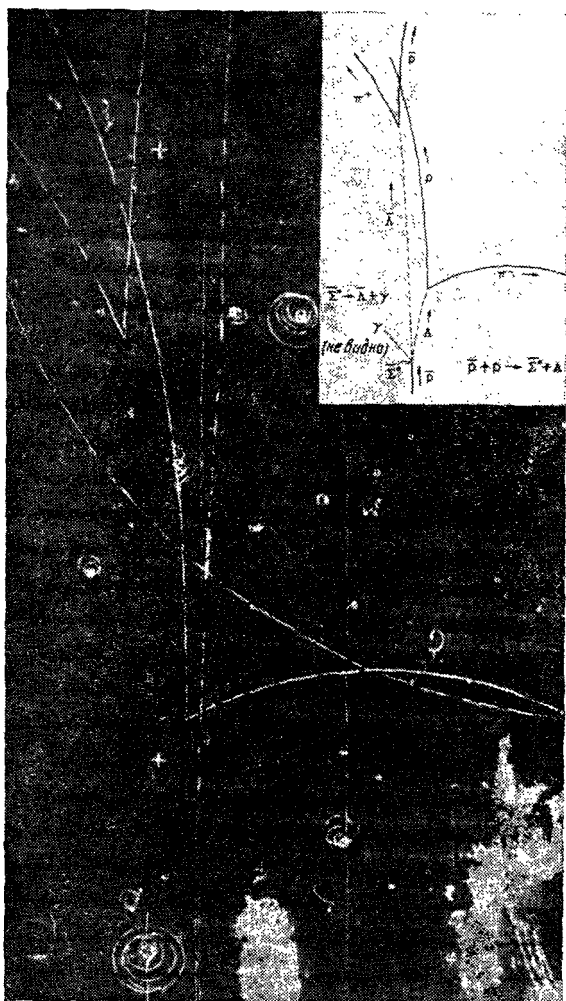
что же «колеблется»; физики прошлого века говорили, что колеблется эфир и что поведение электромагнитных волн в эфире описывается уравнениями Максвелла. Для физиков того времени было естественным желание понять электромагнетизм в рамках *механических* моделей и считать электромагнитные волны чем-то аналогичным упругим волнам в твердом теле. На создание таких моделей было затрачено много усилий. Механические свойства, которыми пришлось наделить эфир, оказались совершенно отличными от свойств любого мыслимого твердого тела или жидкости, но это само по себе не свидетельствовало против теории.

Механическая теория эфира вызывала, однако, серьезные возражения принципиального характера. Рассмотрение механических свойств эфира не вызывалось необходимостью и ничего не добавляло к пониманию электромагнитных явлений. Уравнения Максвелла *сами по себе*, без всякой механической интерпретации, *содержат все*, что в классической электромагнитной теории имеет значение для эксперимента. Например, если мы хотим описать распространение радиоволн от одной антенны к другой, достаточно решить уравнения Максвелла с соответствующими граничными условиями, а наличие или отсутствие механической модели распространения волн не имеет значения. Постепенно физики поняли, что для электромагнетизма имеют значение лишь уравнения Максвелла. Попытки построения механических моделей поэтому были прекращены, и вопрос о том, «что на самом деле колеблется», был признан бессмысленным.

34. Появление специальной теории относительности ускорило кончину механической теории эфира. Постараемся понять, почему это произошло. Если свойства эфира в какой-то степени аналогичны свойствам твердого тела или жидкости, то мы вправе ожидать существования некоторой инерциальной системы, по отношению к которой эфир покоится. С другой стороны, все соответствующие опыты указывали на *невозможность* определить состояние движения относительно эфира: все инерциальные системы полностью эквивалентны друг другу. Последнее утверждение является одной из основ специальной теории относительности. Если оно справедливо, что не вызывает у нас сомнений, то движущийся эфир должен иметь те же физические свойства, что и покоящийся. Такими качествами не может обладать никакое обычное твердое тело или жидкость. В связи с тем, что у эфира оказались фундаментально «немеханические» свойства, бессмысленным было пытаться наделить его другими механическими свойствами.

35. Сегодня *механический* эфир изгнан из физики и само слово «эфир» не встречается больше в учебниках. Мы говорим о «вакууме», демонстрируя тем самым отсутствие интереса к *среде*, в которой происходит распространение волн. Изучая электромагнитные волны или волны де Бройля, мы не спрашиваем больше о том, «что колеблется». Мы ограничиваемся тем, что имеем *волновое уравнение* для этих волн, которое дает нам возможность предсказать экспериментально наблюдаемые явления. Как мы упоминали, эти волновые

уравнения должны быть нелинейными, если мы хотим описать с их помощью взаимодействие частиц. Получение таких волновых

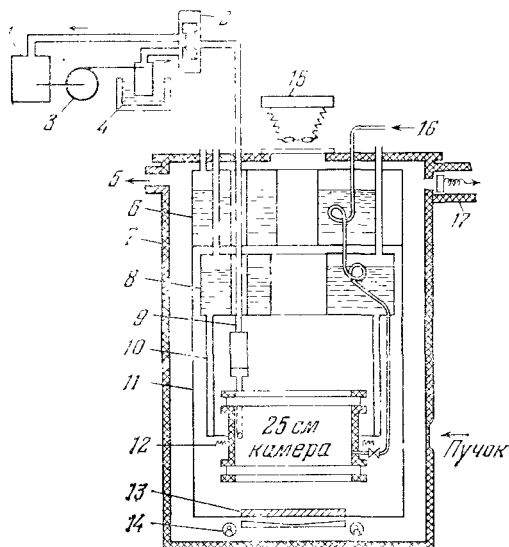


**Рис. 35А.** Снимок образования и распада нейтральной антинейтронной частицы в пузырьковой камере. В верхнем правом углу приведена схема, поясняющая наблюдаемые реакции и природу следов на снимке. Нейтральная частица (штриховые линии на схеме) не оставляет видимого следа в камере. Видимые следы искривлены, так как камера находится в магнитном поле, перпендикулярном к плоскости рисунка. Реакция рождения, в которой в результате столкновения антипротона с протоном образуются  $\bar{\Sigma}^0$  и  $\Lambda$ -частицы, происходит вследствие сильного взаимодействия. Благодаря электромагнитному взаимодействию  $\bar{\Sigma}^0$ -частица распадается на  $\bar{\Lambda}$ -частицу и  $\gamma$ -квант. За остальные распады, наблюдаемые на снимке, ответственны слабые взаимодействия.

уравнений и извлечение из них экспериментальных предсказаний является задачей квантовой теории поля, которая претендует быть фундаментальной теорией элементарных частиц. В этой теории

волны описываются *квантованными полями*, и по своим идеям она является квантовомеханическим обобщением классической волновой теории.

Мысль описать взаимодействие частиц через квантованные поля привлекательна во многих отношениях, и нам следует попытаться понять широкие перспективы такой теории. К сожалению, для этой цели необходим довольно сложный математический аппарат, которым мы еще не владеем, и нам придется ограничиться изложением основных идей.



**Рис. 35В.** Схема небольшой жидководородной пузырьковой камеры длиной 25 см. Камера «возбуждается» внезапным уменьшением давления, под которым находится жидкий водород. При уменьшенном давлении температура жидкости оказывается выше точки кипения, но кипение не может начаться немедленно: в течение короткого интервала времени жидкость остается в перегретом состоянии. Когда через жидкость проходит заряженная частица, происходит испарение, локализованное вдоль траектории. При этом образуется след, состоящий из маленьких пузырьков газа, который может быть сфотографирован. Затем давление снова увеличивают, и все следы исчезают; камера готова к следующему циклу. 1 — резервуар для сбрасывания давления; 2 — клапан сброса давления; 3 — компрессор; 4 — декомпрессирующий бачок для охлаждения жидким азотом; 5 — к вакуумному насосу; 6 — вакуумная рубашка; 7 — вакуумированный бак; 8 — резервуар жидкого водорода; 9 — расширительная линия; 10 — тепловой мост; 11 — азотный экран; 12 — нагреватели; 13 — затвор; 14 — источник света; 15 — фотоаппарат; 16 — подача водорода; 17 — аварийный клапан

36. Рассмотрим в весьма общем виде проблему взаимодействия между двумя (или несколькими) частицами, оставаясь сначала в рамках классической физики. В *нерелятивистской* теории можно было бы ввести зависящие от положения силы, действующие между частицами. Сила, действующая на данную частицу, зависит от ее положения и от положения другой частицы в тот же момент времени. Таким образом, действие сил в этом случае является мгновенным: если положение частицы внезапно меняется, соответствующее изменение силы мгновенно воспринимается другой частицей.

Мы считаем, что любая фундаментальная теория должна находиться в согласии с принципами специальной теории относитель-

ности. Между тем описанное выше мгновенное взаимодействие полностью им противоречит. Никакой сигнал не может распространяться со скоростью, большей скорости света  $c$ , поэтому мгновенное действие сил невозможно. Если положение или состояние движения одной из частиц внезапно меняется, то другая частица почувствует изменение лишь через некоторое время, причем потребное для этого минимальное время равно времени распространения светового сигнала между частицами.

Создание релятивистской инвариантной теории взаимодействия классических частиц отнюдь не тривиальная задача. Для этого необходимо глубокое изменение нерелятивистских идей о мгновенном действии на расстоянии.

37. Возможный способ решения такой задачи заключается в понятии с (классическом) поле. Каждая частица является источником поля, которое способно распространяться в пространстве со скоростью, не превышающей скорость света  $c$ , и это поле влияет на движение других частиц. В релятивистской *классической* теории такого типа мы имеем дело как с частицами, так и с полями. Взаимодействие заряженных частиц, осуществляемое через электромагнитное поле, является хорошим примером такой теории: заряд представляет собой источник электромагнитного поля, и это поле в свою очередь влияет на движение заряженных частиц.

38. Рассмотрим проблему взаимодействия частиц с иной стороны. В классической нерелятивистской теории, где взаимодействие частиц сводится к мгновенно действующим силам, будущее поведение изолированной системы из нескольких частиц однозначно определено, если заданы положения и скорости всех этих частиц в некоторый момент времени. Другими словами, если мы имеем  $N$  частиц, то их состояние движения определяется  $6N$  параметрами: система имеет конечное число степеней свободы. С другой стороны, в релятивистской теории, в которой взаимодействие описывается полями, недостаточно указать положения и скорости частиц в заданный момент времени. Мы должны еще указать и состояние поля. Классическая электромагнитная теория является прекрасным примером такой ситуации: положения и скорости всех заряженных частиц в данный момент времени не определяют однозначным образом электромагнитное поле. Начальные условия должны включать в себя и значения электромагнитного поля в любой точке пространства. Электромагнитное поле требует, однако, для своего описания бесконечно большого числа параметров, и наша система не является больше системой с конечным числом степеней свободы. В этом глубокое различие между релятивистскими и нерелятивистскими теориями.

39. Обратим внимание на другую особенность (классической) релятивистской теории: в любой момент времени часть полной энергии системы заключена в поле. Это свойство любой теории, в которой взаимодействие переносится полем. Рассмотрим, например, две частицы  $A$  и  $B$ , взаимодействующие друг с другом, и пусть частица  $A$  внезапно сталкивается с частицей  $C$ , которая не

действует непосредственно на частицу *B*. Состояние движения частицы *A* изменится, и с течением времени это изменение проявится как изменение поля, создаваемого частицей *A* в месте расположения

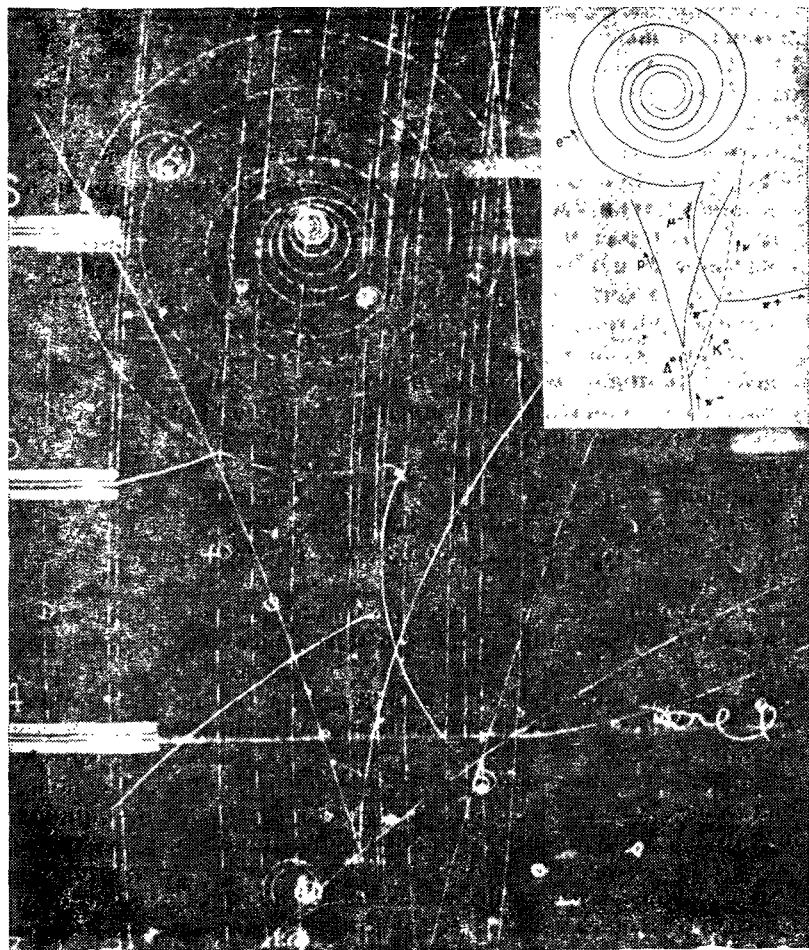


Рис. 39А. Снимок образования и распада нейтральной  $\Lambda$ -частицы и нейтрального  $K$ -мезона в пузырьковой камере. В верхнем правом углу дана схема события. Видимые следы, искривленные магнитным полем, принадлежат заряженным частицам. Нейтральные частицы были образцами в реакции  $p + \pi^- = \Lambda^0 + K^0$ , которая является примером сильного взаимодействия. Распады происходят благодаря слабому взаимодействию. Отрицательный мюон, испущенный при распаде  $K^0$ -мезона, в свою очередь распадается на электрон, нейтрино и антинейтрино. Последние две частицы нейтральны и не оставляют следа в камере

частицы *B*. В конце концов состояние движения частицы *B* тоже изменится; в частности, может измениться ее кинетическая энергия. Таким путем между частицами *A* и *B* произойдет обмен энергией, осуществленный через посредство поля. Если мы хотим построить теорию, в которой имеет смысл понятие о полной энергии системы в

данный момент времени и сохраняется полная энергия изолированной системы, то мы должны спросить себя, где находилась энергия, переданная частице  $B$ , между моментом столкновения частиц  $A$  и  $C$  и последующим моментом, когда частица  $B$  почувствовала изменение состояния частицы  $A$ . Мы вынуждены считать, что эта энергия была заключена в поле.

40. Эти размышления позволяют сделать еще один интересный вывод. Допустим, что ситуация не изменилась, но частица  $B$  отсутствует. В тот момент, когда частицы  $A$  и  $C$  столкнулись, поле, создаваемое частицей  $A$ , изменилось, и некоторая часть энергии частицы  $A$  перешла в поле. Это та же часть энергии, которая имела в присутствии частицы  $B$ , так как частица  $A$  не «знает», что частица  $B$ , которая может воспринять энергию, отсутствует. Но если частицы  $B$  нет, куда исчезает энергия, передаваемая полю? Она куда-то уходит, и одна из возможностей ее исчезновения — излучение в пространство. Именно это и происходит в электромагнитной теории: если заряженная частица  $A$  сталкивается с другой частицей  $C$  (которая может быть и нейтральной), то частица  $A$  испускает электромагнитные волны, которые могут перенести энергию «в бесконечность», если нет других частиц, способных поглотить часть этой энергии.

Мы пришли, таким образом, к весьма общему выводу: если взаимодействие между частицами осуществляется полем, то поле должно проявить себя в виде свободно распространяющихся и переносящих энергию волн.

41. Рассмотрим теперь проблему взаимодействия частиц с точки зрения квантовой механики. Еще в первых главах книги мы пришли к заключению, что с каждой частицей связана волна и что, с другой стороны, каждая волна имеет некоторые свойства частицы. Можно сказать, что квантовомеханическая волна идентична квантовомеханической частице: это один и тот же объект, поведение которого не совпадает ни с поведением классической частицы, ни с поведением классического волнового пакета. Такая точка зрения приводит к замечательному упрощению наших концепций. В классической физике мы имеем дело с двумя типами объектов — с частицами и волнами, осуществляющими взаимодействия между частицами. В квантовой физике удастся избежать этой двойственности, рассматривая «частицы» и волны как различные проявления свойств одного и того же объекта. Мы формулируем теорию поля, описывающую распространение волн-полей, которые представляют собой дебройлевские волны частиц. Такая теория поля описывает также и взаимодействие между волнами, сводя к нему эффективные силы, действующие между частицами.

Это весьма привлекательная идея, и она является основой квантовой теории поля. В теории Шредингера силы между частицами должны быть заданы. Задав их, можно предсказать движение частиц, но сама теория Шредингера не дает никакого «объяснения», почему силы таковы. С другой стороны, в квантовой теории поля существование и природа сил тесно связаны с существованием частиц: мы

единым образом описываем частицы, волны и силы. Квантовая электродинамика, которая является одной из теорий поля, дает нам хороший пример этих свойств теории. Действительно, силы между электронами (и позитронами) возникают как проявление электромагнитного поля, а кванты электромагнитного поля (фотоны) испускаются взаимодействующими электронами.

42. Сделаем обзор основных идей квантовой теории поля. Квантовые поля вводятся для описания частиц и взаимодействия между ними. Поля зависят от координат и времени и описывают то, что называют *локальным* состоянием вакуума \*). Волновой аспект материи вводится в теорию с самого начала: решения уравнений квантовой теории поля являются волнами. Волны имеют также свойства частиц. Хорошо локализованная частица соответствует концентрированному волновому пакету: частицу легче всего найти в той области пространства-времени, в которой амплитуда поля велика.

Уравнения поля нелинейны, и поэтому они могут описывать *взаимодействия* между волновыми пакетами (частицами). Нелинейность проявляет себя лишь в тех случаях, когда амплитуда поля велика. Если амплитуды малы, то волны распространяются приблизительно так же, как и в линейной теории. Если два волновых пакета, соответствующие двум частицам, перекрываются в данный момент времени в некоторой части пространства, нелинейность становится существенной и две волны влияют друг на друга. В классической картине это соответствует взаимодействию между двумя частицами. С другой стороны, если волны не перекрываются, между ними нет заметного взаимодействия, и это отвечает классической картине двух частиц, очень слабо взаимодействующих, если расстояние между ними велико.

43. Квантовая теория поля является существенным образом *теорией многих частиц*: она дает единый метод, пригодный для описания состояний с любым числом частиц данного типа. Рождение и исчезновение частиц представляют собой естественные и обычные для этой теории процессы. Их существование связано с нелинейным характером уравнений поля. Два волновых пакета (отвечающие двум частицам) могут перекрываться, взаимодействовать и создавать новые волновые пакеты (соответствующие новым частицам). Например, при столкновении двух электронов испускаются электромагнитные волны. Мы говорим, что происходит рождение фотона.

44. В соответствии с этими идеями были сформулированы многие более или менее глубокие квантовые теории поля. Классическим примером такой теории является квантовая электродинамика, которая достигла замечательных успехов в описании электромаг-

---

\*) Поля не являются больше «обычными» комплексными функциями, зависящими от координат и времени. Они представляют собой математические объекты, определяемые операторами. Для наших целей можно, однако, считать их обычными функциями.



нитных взаимодействий заряженных частиц, и особенно в атомной физике. Специальные предположения, лежащие в основе других теорий поля, призванных объяснить слабые и сильные взаимодействия, оказались менее успешными. Эти теории дали нам понимание

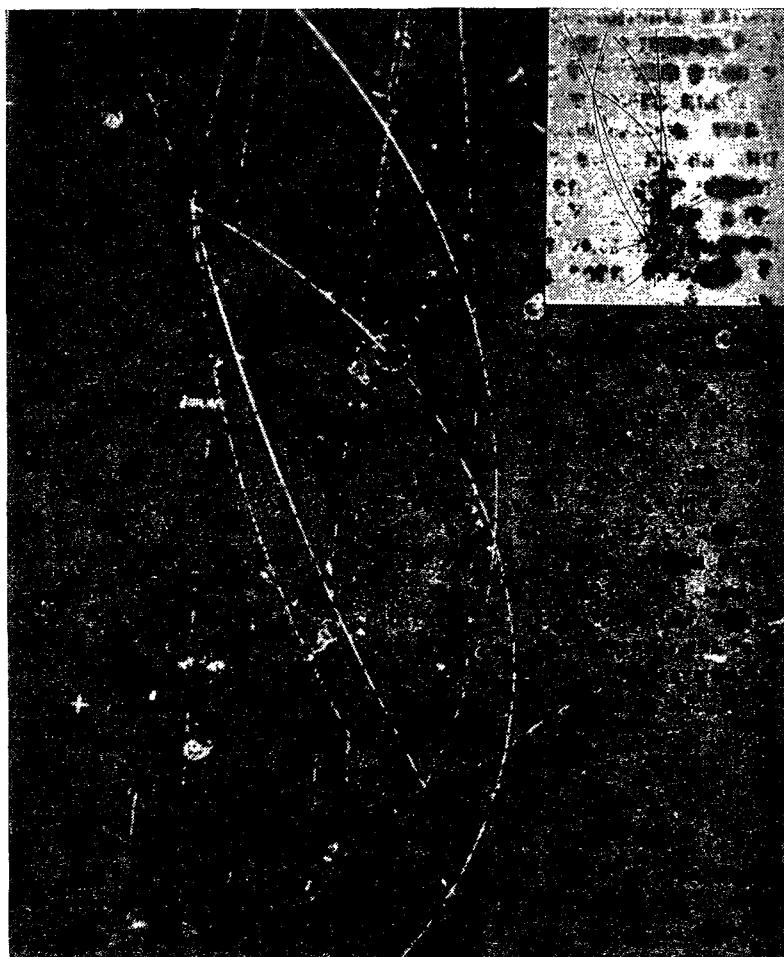


Рис. 44А. Фотография образования и последующего распада пары лямбда — антилямбда. В верхнем правом углу дана схема события. Входящий в камеру антипротон сталкивается с протоном и образует пару лямбда — антилямбда. Обе эти частицы нейтральны и не оставляют видимых следов в камере. Лямбда-частица распадается (за счет слабых взаимодействий) на протон и отрицательный пион, а антилямбда-частица образует при распаде антипротон и положительный пион. Затем антипротон сталкивается с протоном и аннигилирует. При этом образуются пионы, четыре из которых заряжены и оставляют видимые следы. Мы приводим эту фотографию в середине обсуждения квантовой теории поля. Одной из задач такой теории является объяснение подобных явлений

некоторых, весьма общих свойств элементарных частиц, но не привели, однако, к существенным предсказаниям, проверяемым на опыте. В случае сильных взаимодействий метод последовательных

приближений, на котором основаны успехи квантовой электродинамики, оказывается неприменимым. Причиной успехов электродинамики несомненно является малость постоянной тонкой структуры, т. е. слабость электромагнитных взаимодействий. Сильные взаимодействия чрезвычайно сильны. Это обстоятельство не позволяет найти решение предложенных уравнений поля, а не имея таких решений, нельзя судить о пригодности самих уравнений. Скорее всего они не годятся. Существуют бесконечные возможности выбора уравнений, и в прошлом единственным руководящим принципом был «принцип простоты». Лишь для квантовой электродинамики путеводной нитью новой теории была классическая аналогия заряженных частиц, взаимодействующих с электромагнитным полем.

45. В настоящее время математические трудности теории непреодолимы и нельзя получить *решение* уравнений поля, предложенных для описания сильных взаимодействий. Такая ситуация привела к некоторому разочарованию в самих теориях поля как таковых. Раздались голоса, требовавшие отказаться от дальнейших попыток в этом направлении.

Против квантовой теории поля могут быть выдвинуты еще более веские возражения эпистемологического характера. Можно сказать, что *основные принципы* теории ставятся под сомнение на том основании, что не имеют непосредственного «операционального» значения (operational significance). Например, неясно, как могут быть измерены, хотя бы в принципе, сами поля. Лишь в отдельных специальных случаях эта проблема получила сколько-нибудь удовлетворительное решение. Возникает также вопрос: как ведут себя поля в очень малых областях пространства, с линейными размерами порядка, скажем,  $10^{-100}$  см? Как и какими «приборами» можно измерить поля в таких областях? Удавалось ли кому-нибудь измерить (в любом значении этого слова) расстояния, меньшие  $10^{-13}$  см?

Все эти возражения и вопросы действительно серьезны. Но против них следует, однако, заметить, что нет необходимости, чтобы каждое понятие теории имело *непосредственный* операциональный смысл. Хотя трудно представить себе, как можно «измерить» расстояния порядка  $10^{-100}$  см, однако можно сохранить пространственно-временные координаты для описания «арены», на которой происходят физические явления. С другой стороны, не исключено, что будущая успешная теория взаимодействия элементарных частиц связана с отказом от некоторых из наших представлений о пространстве и времени. Квантовые теории поля дают *детальное* описание происходящего в любой точке пространства в любой момент времени. Вполне возможно, что это слишком большое требование и такое описание немислимо в принципе.

46. Подобные соображения привели Вернера Гейзенберга в 1943 г. к новой теории взаимодействия частиц, названной теорией S-матрицы. В этой теории, которую мы не станем здесь обсуждать, Гейзенберг попытался рассмотреть лишь понятия, которые имеют ясный операциональный смысл. Он следовал, таким образом, тем

же идеям, которые в 1925 г. привели его к созданию матричной механики. Можно сказать, что теория  $S$ -матрицы имеет дело лишь с *результатом* процессов столкновения, а не с детальной последовательностью явлений, происходящих в течение самого процесса. До сих пор, однако, не удалось создать удовлетворительной теории. В настоящее время не существует *фундаментальной* теории сильных взаимодействий. Было сделано много попыток создания такой теории, но результаты не кажутся очень убедительными. Возможно, будущей теорией будет полевая теория или теория, подобная теории  $S$ -матрицы, а может быть, и совершенно новая теория, которую, возможно, удастся создать кому-нибудь из читателей этой книги.

## Пионы и ядерные силы

47. Совершенно очевидно, что в этой книге мы не в состоянии обсуждать детали квантовой теории поля. Для этого нужно владеть весьма сложным математическим аппаратом. С другой стороны, мы уже убедились, что основные идеи такой теории просты. Прежде чем оставить эти проблемы, рассмотрим задачу, которую первым успешно решил Хидеки Юкава в 1934 г.

Вопрос заключается в том, существуют ли частицы, связанные с ядерными силами. Иными словами, это вопрос о существовании квантов поля ядерных сил. Если такие кванты существуют, то каковы их свойства? Можно ли их наблюдать экспериментально?

Известно, что с электромагнитными силами, действующими между заряженными частицами, связана частица, а именно фотон. Известно также, что силы, связывающие нуклоны в ядро, не электромагнитного происхождения. Они гораздо сильнее электромагнитных сил и, кроме того, отличаются от них очень малым радиусом действия. На расстояниях, превышающих  $10^{-12}$  см, ядерные силы очень быстро спадают до нуля и при расстояниях, больших  $10^{-11}$  см, не имеют уже никакого практического значения. Приняв идеи квантовой теории поля, следует ожидать, что поле ядерных сил может проявить себя тоже в виде свободно распространяющихся волн, и нас интересует вопрос о соответствующих частицах. Подобно тому, как при столкновениях заряженных частиц испускаются фотоны, можно ожидать, что и при достаточно сильном столкновении двух нуклонов будут испущены кванты ядерного поля сил.

48. Читатель, вероятно, слышал, что такие частицы существуют и что они называются *пионами*. В 1934 г. о существовании мезонов никто не подозревал и предположение Юкавы было поистине пророческим. Ему были известны лишь два замечательных свойства ядерных сил — их большая величина и малый радиус действия, и он поставил перед собой приведенные выше вопросы. Зная свойства ядерных сил, он не только смог предсказать существование соответствующих квантов, но и указал, что их масса должна быть приблизительно в 200 раз больше массы электрона. В этой работе он, несомненно, руководствовался аналогией с электромагнитным взаимодействием.