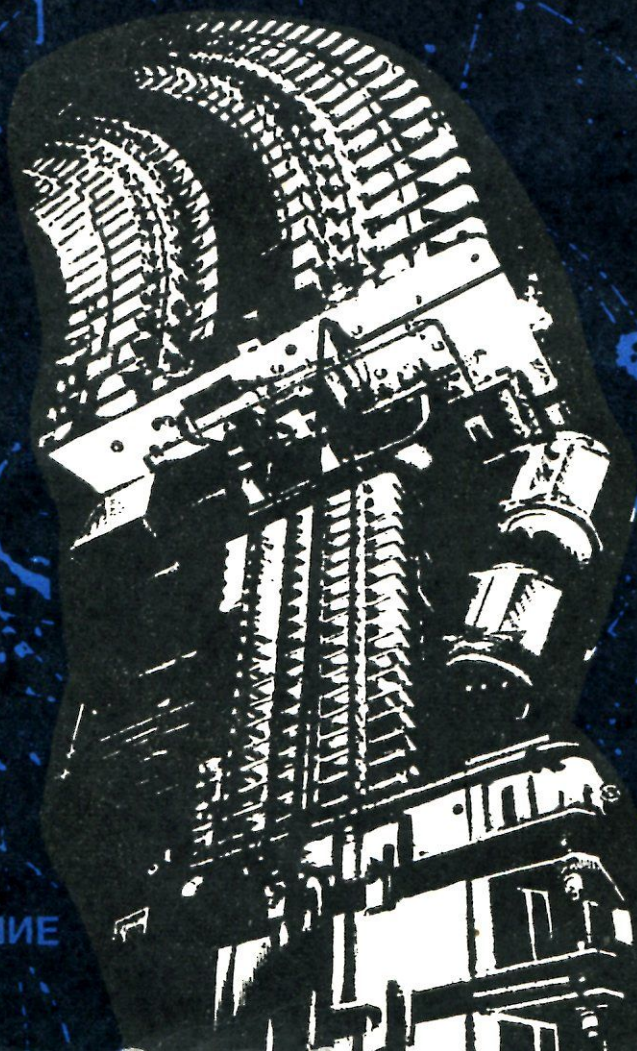


ПО Э.И. ДУБОВОЙ



НАУКА
И ПРОГРЕСС

следам НЕВИДИМОК

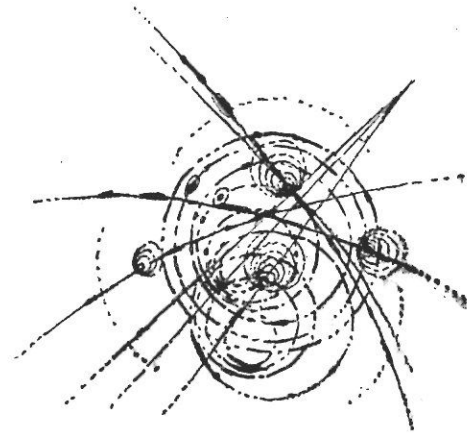


ЗНАНИЕ

по Э.И. ДУБОВОЙ
следам
НЕВИДИМОК



НАУКА
И ПРОГРЕСС



Издательство «Знание»
Москва 1985

Рецензенты: начальник сектора ОИЯИ (г. Дубна), доктор физико-математических наук В. С. Барашенков; доктор физико-математических наук, ст. научный сотрудник ФИАНа О. К. Калашников; начальник отдела Московского радиотехнического института АН СССР, доктор технических наук, лауреат Государственной премии Б. П. Муриш.

Дубовой Э. И.

Д 79 По следам невидимок.— М.: Знание, 1985.—
(Наука и прогресс).

30 к.

80000 экз.

Чем глубже физика проникает в строение материи, тем технически изощреннее, сложнее, масштабнее становятся средства исследования. Обладая таким мощным техническим инструментарием, опираясь на теорию, физики открывают все новые и новые элементарные частицы, исследуют их природу и свойства, искусственно получают химические элементы, которых нет в природе. Рассказывая об этом, автор основное внимание уделяет последним достижениям в физике элементарных частиц, еще детально не освещенным в популярной литературе. Для широкого круга читателей.

Д $\frac{1704070000-039}{073(02)-85}$ 20-85

ББК 22.382
530.4

© Издательство «Знание», 1985 г.

Последнее десятилетие ознаменовалось впечатляющим прогрессом в физике элементарных частиц, наших представлениях о физике микромира. В первую очередь это обусловлено созданием новой базы для проведения экспериментальных исследований по физическим проблемам — огромных по своим масштабам электрон-позитронных ускорительно-накопительных систем для встречных пучков с энергиями 20—30 миллиардов электронвольт, а также протонных ускорителей на энергию 400—500 миллиардов электронвольт и на их основе накопителей для реализации антипротон-протонных встречных соударений. В поставленных на этих установках опытах были открыты добавочно к мю-мезону новый тяжелый родственник электрона тау-лептон в две протонные массы, пси-мезон, долго живущий в ядерном масштабе времени, ипсилон-мезон, в десять протонных масс. Новые частицы трактуются как свидетельства существования добавочно к ранее известным трем еще двух кварков с новыми квантовыми числами. В слабых взаимодействиях проявились так называемые нейтральные токи. Это позволило построить единую картину слабых и электромагнитных взаимодействий. В опытах со встречными антипротон-протонными пучками в 1983 году нашли переносчиков слабого взаимодействия с массами 70—90 миллиардов электронвольт — это дубль-в- и зет-бозон (W-бозон и Z-бозон).

Развиваемые на основе последних открытий единые теории всех типов взаимодействия поставили под сомнение представление об устойчивости вещества во Вселенной, основанное на стабильности протона. Пересматривается взгляд на развитие самой Вселенной — от бесконечно расширяющейся модели перешли к модели сперва расширяющейся, а затем, возможно, и сжимающейся. Оказывается, что будущее мира зависит от того, есть ли у самой крошечной частицы — нейтрино — масса и какова ее величина. Имеются экспериментальные указания на то, что масса нейтрино находится в интервале 15—46 электронвольт.

Какое место в системе наших знаний займут эти факты, окончательно еще неясно. Но выглядит необычным сам масштаб масс и времен жизни новых элементарных частиц. А так ли они элементарны?

С ростом энергии слабое и электромагнитное взаимодействия становятся сильными, различия между ними исчезают и т. п. Под угрозой пересмотра оказались устоявшиеся физические представления, поставлены новые вопросы. Возможно, что современный этап в развитии физики будет признан революционным, каким было для нее последнее десятилетие XIX века, когда открыли электрон и радиоактивность.

Предлагаемая книга «По следам невидимок» рассказывает обо всем этом доступно, но отнюдь не в ущерб научной стороне вопроса. В ней приводятся основные установленные в физике частицы факты и подробно освещены успехи последнего десятилетия. Читателям будет интересно узнать о разработке и осуществлении у нас в стране и за рубежом новых проектов: ускорительного-накопительного комплекса в Серпухове, мезонной фабрики в Красной Пахре, протон-антипротонного и электрон-позитронного накопительных колец в Швейцарии и США, нейтринных обсерваторий на дне океана и Байкала и т. д.

Содержание книги представляет познавательный интерес для широкого круга читателей, выпускников школ, преподавателей физики, всех лиц, интересующихся современной физикой. Позволим высказать надежду, что эта книга направит молодого читателя на путь поиска и научных изысканий, ведущих к новым открытиям.

Доктор физико-математических наук,
профессор *И. В. ЧУВИЛО*

Часть I.

Мир частиц

ГЛАВА I. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ — КАК ЭТО НАЧИНАЛОСЬ?

— Простите, разве мы не с радостью следим
За духом времени? За много лет пред нами
Как размышлял мудрец и как в сравнении
с ним
Неизмеримо в даль продвинулись мы сами?
— Да, но что значит знать? Вот в чем все
затруднения!
Кто верным именем младенца наречет?

И. В. Гёте

Дискретность вещества и электричества *

Объясняя явления окружающего мира: распространение запахов, перемешивание жидкостей и т. д., — древние атомисты считали, что вещества состоят из легчайших невидимых частиц — атомов и пустого пространства. По их мнению, различие в атомах и их движении приводит ко всему многообразию мира природы. Выведенные умозрительно и будучи не более чем догадками, хотя и великими, эти представления древних мыслителей веками ждали своего экспериментального подтверждения.

В 1833 году английский физик М. Фарадей для объяснения закона электролиза предположил, что каждая молекула вещества электролита переносит равный электрический заряд. Фарадей измерил в опытах по электролизу отношение «элементарной» массы молекулы к ее заряду.

Чтобы гипотеза о том, что электричество представляет собой движение заряженных частиц, стала теорией, важно было обнаружить эти самые частицы — «переносчики» электричества, подобно тому как для выяснения

* Рождению и развитию современной физики и ее представлений о строении материи посвящено множество книг, статей, публикаций как специального, так и популярного характера. Поэтому читателей, которые хотели бы более подробно познакомиться с этой темой, автор отправляет к литературе, указанной в конце книги. Здесь же, чтобы подготовить читателей к восприятию нового материала, автор ограничивается кратким обзором основных событий и таким же обзором свойств элементарных частиц.

природы инфекционных заболеваний было необходимо убедиться в существовании бактерий и вирусов.

Исследования немецкого физика Ю. Плюккера в 50—60-х годах прошлого века по прохождению тока уже не через растворы, как при электролизе, а через газы привели к открытию неизвестного ранее излучения (из катода газоразрядной трубки). Поначалу полагали, что катодное излучение тождественно электромагнитному, но относится к другому волновому диапазону. Однако дальнейшие опыты английского физика У. Крукса показали, что новые лучи вызывают вращение помещенного на их пути колесика, а значит, обладают импульсом. В то время в полном соответствии с законами классической механики считалось, что импульс могут иметь только частицы с массой. У электромагнитной волны наличие импульса не предполагали. Стало быть, катодные лучи имеют корпускулярную природу, то есть состоят из частиц, имеющих массу.

Однако правильное заключение было получено из неправильной предпосылки об отсутствии импульса у электромагнитной волны. В действительности же, как доказал экспериментально в 1899 году русский физик П. Н. Лебедев, электромагнитная волна также имеет импульс. В отличие от Крукса Лебедев экспериментировал не с катодными лучами, а со светом, во всем остальном опыты обоих ученых были схожи.

В 1894 году английский физик Д. Томсон в тончайшем эксперименте измерил скорость движения частиц, из которых, как предполагали, состоят катодные лучи. Оказалось, что она составляет сотни километров в секунду, что в тысячи раз меньше скорости электромагнитных волн.

В 1895 году французский физик Ж. Перрен измерил заряд, переносимый частицами катодных лучей. Он оказался отрицательным.

В те же годы Д. Томсон проанализировал опыты немецкого физика Ф. Ленарда по рассеянию катодных лучей в воздухе и пришел к выводу о том, что диаметр частиц, из которых состоят катодные лучи, в тысячи раз меньше диаметра молекул воздуха. Это соображение, подтвержденное экспериментальным выводом о независимости свойств катодных лучей от природы газа и типа металла в катоде, дало основание Томсону предположить, что частицы катодных лучей являются компонентами атомов любого химического элемента.

А когда изучили отклонение лучей в электрическом и магнитном полях, выяснилось, что отношение заряда частиц катодных лучей к массе в тысячи раз больше аналогичного отношения для ионов, измеренного в опытах Фарадея по электролизу. Это также подтверждало вывод о том, что масса частиц в катодных лучах значительно меньше массы атомов.

К 1897 году благодаря опытам Томсона и Перрена гипотеза о корпускулярной природе катодного излучения получила признание. Два безусловно установленных факта неопровержимо свидетельствовали в ее пользу: то, что катодные частицы отрицательно заряжены, и то, что они имеют массу в тысячи раз меньше массы атомов.

Этот год принято считать годом открытия электрона (само название «электрон» предложил еще в 1891 году ирландский физик Д. Стоней).

Однако фундаментальность открытия стала ясна только в результате последующих опытов, с несомненностью доказавших, что электрон действительно входит в состав атомов. До этого он сам был «атомом электричества».

В 1896 году нидерландский физик П. Зеeman обнаружил расщепление в магнитном поле излучаемой атомами натрия спектральной линии света. Это явление объяснил его соотечественник Х. Лоренц, исходя из предположения о том, что внутри атомов существуют вращающиеся по орбитам заряженные частицы. При вращении они излучают свет определенной частоты*. В магнитном поле орбиты этих частиц изменяются, что приводит уже к излучению света близких частот — расщеплению одной спектральной линии на две. Знание величины изменения частоты позволяет рассчитать отношение заряда к массе для таких гипотетических частиц в атоме. Это отношение оказалось таким же, как и для электрона Томсона, то есть частицы в атоме те же, что и в катодных лучах! Именно Зеeman и Лоренц доказали предположение Томсона об электроне как атомной частице.

В 1899 году Д. Томсон измерил отношение заряда к массе для частиц, вырываемых из металла светом (фо-

* Так считал Х. Лоренц. Квантовая механика, о чем мы будем говорить дальше, установила, что при вращении электронов по орбитам излучения света не происходит. Свет испускается только при переходе электронов с одной орбиты на другую.

тоэлектрический эффект) или испускаемых раскаленным металлом. И оно также оказалось равным известному для электронов.

В 1896 году французский физик А. Беккерель обнаружил явление радиоактивности и уже в 1900 году определил отношения заряда к массе частиц, испускаемых радиоактивными веществами. Как читатель догадывается, оно также оказалось равным этой величине для электрона.

Так была открыта первая элементарная частица.

О фотоне

Существование другой элементарной частицы (корпускулы света) предполагал еще великий И. Ньютон. Однако он же допускал возможность и того, что свет обладает волновыми свойствами.

Соперничество этих двух представлений о природе света завершилось созданием квантовой теории, на основе которой были поняты и объяснены такие явления, как интерференция и дифракция света. Основной вклад в разработку волновой теории внесли голландец Х. Гюйгенс, англичанин Т. Юнг, француз О. Френель, а затем английский теоретик Д. Максвелл, предсказавший существование электромагнитных волн. Из сформулированной Максвеллом системы уравнений вытекало, что свет представляет собой один из видов электромагнитного излучения.

Волновая теория света благополучно господствовала до 1900 года. В этом году немецкий физик-теоретик М. Планк возродил, можно сказать, корпускулярную теорию. Спектр электромагнитного излучения раскаленной металлической полости ему впервые удалось объяснить, допустив, что свет излучается порциями — квантами. Эта гипотеза Планка была развита великим немецким физиком, будущим создателем теории относительности А. Эйнштейном, предположившим дополнительно, что свет и поглощается квантами. Эйнштейн применил закон сохранения энергии к соударению квантов света с электронами в металлах и объяснил закономерности фотоэффекта, в частности, что падающий на металл свет выбивает электроны только в том случае, если частота света превышает некоторую минимальную величину (ее называют красной границей фотоэффекта).

Кванты света впервые назвал фотонами американ-

ский физикохимик Г. Льюис в 1929 году в статье, появившейся в журнале «Nature».

Любопытный факт: электрон сначала назвали, а потом только его открыли; с фотоном все произошло наоборот — сначала открыли и лишь спустя несколько лет дали ему имя.

Выдающийся эксперимент американского физика А. Комптона в 1923 году по рассеянию рентгеновских лучей на кристаллах дал новое неопровержимое доказательство правильности представления о свете как частице. Основным результатом опыта состоял в открытии зависимости частоты рентгеновских лучей от угла рассеяния. Комптон объяснил это явление, приписав квантам рентгеновских лучей импульс, как это принято для частиц, и применив закон сохранения импульса к соударению кванта с электроном в кристалле.

Если свет состоит из частиц, то, естественно, этим частицам, фотонам, можно сообщать энергию в процессе рассеяния на движущихся ускоренных электронах. Эта идея легла в основу опытов по рассеянию фотонов видимой части спектра (имеющих энергию всего несколько электронвольт *) на электронах высокой энергии, полученных в ускорителе. Оказалось, что фотоны могут отражаться от электронов, подобно тому как брошенная шайба отскакивает от движущейся навстречу клюшки. Происходит лобовое столкновение фотонов с электронами в пучке. Фотоны ведут себя как материальные частицы с определенной кинетической энергией и импульсом. Удар клюшки может в десятки раз увеличить энергию шайбы. Точно так же и энергия фотонов увеличивается — но уже в миллиарды раз — при их рассеянии на ускоренных электронах. Когда в Физическом институте АН СССР им. П. Н. Лебедева в качестве источника первичного пучка света использовали мощный импульсный лазер, фотоны с энергией всего в несколько электронвольт разгонялись до энергии в несколько гигаэлектронвольт **.

Процесс ускорения фотонов, так же как и комптоновское рассеяние, демонстрирует единую природу фотонов, принадлежащих к разным областям электромагнитного спектра — от видимого света с длиной волны в тысячи

* Электронвольт — энергия, приобретаемая электроном при прохождении ускоряющей разности потенциалов в один вольт. Электронвольт равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ джоуля.

** Гигаэлектронвольт — это миллиард электронвольт.

ангстрем до жестких гамма-лучей с длиной волны в миллионные доли ангстрема*.

О протоне и мезонах

История открытия третьей элементарной частицы — протона непосредственно связана с исследованием делимости атома. С 1908 года в лаборатории английского физика Э. Резерфорда проводились опыты по рассеянию альфа-частиц (так назвали положительно заряженные частицы, испускаемые радиоактивными элементами) на фольге из разных металлов. В этих опытах было обнаружено отклонение отдельных частиц на большие углы от первоначального направления, что дало Резерфорду основание сформулировать в 1911 году идею о существовании у атома положительно заряженного ядра малого размера. Ударяясь о него, редкие альфа-частицы, как мячики, отскакивали назад. В 1914 году Резерфорд бомбардировал водород электронами и обнаружил образование положительно заряженных частиц, которые отождествил с ядром атома и назвал протоном.

В 1930—1932 годах опыты по бомбардировке атомов бериллия альфа-частицами от радиоактивного элемента полония завершились открытием нейтрона. Честь открытия принадлежит немецким физикам В. Боте и Г. Беккеру, французским Ф. Жолио и И. Кюри, английскому физiku Д. Чедвику. Однако предположение о существовании нейтрона как нейтрального аналога протона высказывалось еще в 1920 году учителем Чедвика Резерфордом.

Так во втором десятилетии XX века благодаря экспериментальным работам Резерфорда и его последователей в атомной физике зародилось новое научное направление, сформировавшееся вскоре в новую физическую науку — ядерную физику.

Античастицы

История открытия античастиц берет начало с работ 1928 года английского теоретика П. Дирака, в которых он предложил уравнение движения электрона и протона. Из уравнения следовало, что наряду с электроном и протоном должны существовать и их антиподы — античастицы, отличающиеся от частиц знаком заряда — позитрон и антипротон. В парадоксальное утверждение Дирака

не поверили, и специальные опыты по поиску античастиц не ставились. Предсказание Дирака подтвердилось, если так можно сказать, непреднамеренно. И подтвердил его американский физик К. Андерсон, исследуя энергетический спектр электронов космического излучения.

Ранее в течение нескольких лет частицы космического происхождения изучались в помещенной в магнитное поле наполненной газом камере Вильсона*. Прошедшие через нее частицы космических лучей вызывали парообразование вдоль своего следа. Этот след и фотографировался. Аналогичное явление конденсации пара мы наблюдаем на небе, когда следим за полетом сверхзвукового реактивного самолета. Центрами парообразования в этом случае становятся частички от сгоревшего топлива.

В камере Вильсона центры конденсации — это ионы, образующиеся вдоль следа (физики говорят, трека) пролетевшей заряженной космической частицы. Среди сфотографированных Андерсоном следов был обнаружен трек, отвечающий частице с массой электрона, но с противоположным зарядом, а потому и отклоненный в магнитном поле в противоположную сторону, нежели это характерно для электрона. Новая частица и была позитроном, существование которого предсказал Дирак.

Интересно, что в аналогичных опытах с камерой Вильсона и ранее наблюдали следы, искривленные в магнитном поле в разные стороны. Однако считалось, что частицы прилетают в камеру с разных сторон: как из воздуха, так и из Земли. Теперь мы знаем, что радиоактивных частиц из Земли вылетает мало, а основную массу пролетающих через камеру частиц составляют те, которые образуются вследствие взаимодействия космического излучения с атомами и молекулами газообразной оболочки вокруг Земли. Андерсон догадался поставить опыт так, чтобы выяснить направление движения частиц в камере Вильсона. Для этого достаточно было поместить поперек камеры свинцовую пластинку. Пролетевшая через нее частица теряла энергию и искривлялась в магнитном поле значительно сильнее, чем до нее. Оказалось, что все частицы прилетали сверху, но искривлялись в магнитном поле в разные стороны. Значит,

* О камере Вильсона и других технических средствах, которыми пользуются физики-экспериментаторы, изучая микромир, мы будем говорить более подробно во второй части книги.

* Ангстрем — стомиллионная доля сантиметра.

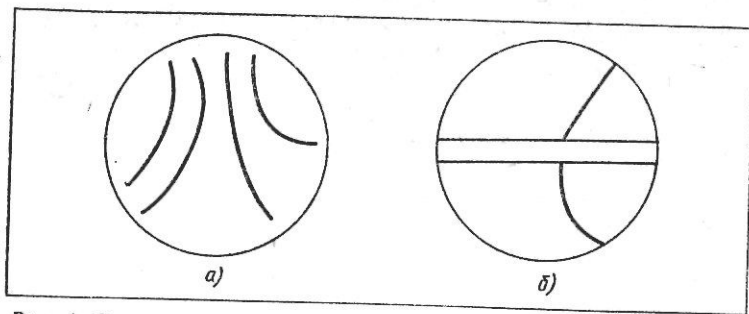


Рис. 1. Схема следов космических частиц на фотографиях, полученных Андерсоном в камере Вильсона. Вектор напряженности магнитного поля перпендикулярен плоскости рисунка и направлен вниз: *а* — видны следы частиц обоих знаков заряда; *б* — след частицы, сильно искривленный в магнитном поле после прохождения свинцовой пластинки, что позволило определить направление движения частицы и знак ее заряда.

у них были разные заряды. По кривизне следа и длине пробега частицы можно было отличить электроны и позитроны от протонов (рис. 1). Так открыли позитрон. Произошло то, что уже не раз бывало в науке, когда сначала какое-то явление открывалось теоретически, «на кончике пера», затем его обнаруживали экспериментально. Дирак «вычислил» частицу, а Андерсон ее «увидел»*.

Существование новой частицы с массой в 200 масс электронов, взаимодействующей с протонами и нейтронами с большой интенсивностью, предположил в 1935 году японский теоретик Х. Юкава. «Надобность» в такой частице к тому времени крайне назрела. Без нее нельзя было понять и объяснить устойчивость атомных ядер, ведь они состоят из нейтральной частицы — нейтрона и положительно заряженной — протона. Что их «держит» вместе, какие силы? По мнению Юкавы, кроме нейтрона и протона, должна была существовать частица, прямое назначение которой — быть переносчиком взаимодействия (такое взаимодействие получило название сильного). Нейтрон с протоном, а также нейтрон с нейтроном или протон с протоном обмениваются в ядре между собой

* О том, как теоретически, а затем экспериментально была открыта первая античастица, подробно рассказано в кн.: Сапожников М. Антимир — реальность? М., Знание, 1983.

этой частицей непрерывно, образуя, таким образом, прочно связанную систему «частица — ядро».

Поиски предсказанной Юкавой частицы начались также в космических лучах. И уже в 1936 году на фотографиях следов частиц в камере Вильсона Андерсон увидел слабо искривленный по сравнению с электронным треком, оставленный, возможно, частицей ожидаемой массы. Эту частицу назвали мю-мезоном (греческая буква μ). Однако последующее ее изучение показало, что частица не имеет основного свойства, предсказанного Юкавой: мю-мезон взаимодействует с нейтронами и протонами в ядрах по-иному (физики называют такой тип взаимодействия слабым) и потому легко проходит через вещество.

Поиски частицы, существование которой предсказал Юкава, продолжались. В 1947 году английский физик С. Пауэлл применил новую методику изучения космических частиц. Он стал искать следы частиц в экспонированных фотопластинках, покрытых изобретенной им специальной толстослойной фотомульсией. И предсказание Юкавы подтвердилось. Найденную частицу назвали пи-мезоном, или, кратко, пионом (ее обозначают греческой буквой π : π -мезон). Масса этой частицы оказалась несколько больше мю-мезонной, а характер взаимодействия с веществом соответствовал предсказанию Юкавы. Выяснилось затем, что мю-мезон, или мюон, и пион — близкие родственники. Мюон образуется в результате распада пиона, живущего очень короткое время — всего 10^{-8} секунды. Мюон не участвует в ядерных процессах, и само его существование до недавнего времени было полнейшей загадкой. Он ничего не объяснял и был совершенно «лишним» в теории. Зачем природе понадобилось создавать двойника электрону, обладающего всеми его свойствами, но только более тяжелого? Существование мюона стало одной из загадок микромира, и только в последние годы физики, кажется, подошли к разгадке. Но об этом расскажем позже.

С открытия мюона и начала «бескорыстного» изучения его свойств (изучения, не имевшего целью объяснение ядерных сил) от ядерной физики отделилась новая ветвь — физика элементарных частиц, теоретическим и экспериментальным достижениям которой последних лет и посвящена эта книга.

Физика элементарных частиц изучает их свойства,

взаимодействия между ними. Под элементарной частицей понимают не только геометрически неделимый объект, но и нечто, ведущее себя как единое целое во всех физических опытах*.

ГЛАВА 2. СВОЙСТВА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Все физические законы подчинены одним и тем же законам сохранения.

Р. Фейнман

...Время есть величайший из новаторов.

Ф. Бэкон

Движение частиц

Как правило, элементарные частицы движутся со скоростями, близкими к скорости света, и тогда их движение определяется соотношениями, выведенными на основе теории относительности. Такие скорости и соответствующие им энергии и импульсы называют релятивистскими. При соударениях частиц соблюдаются законы сохранения классической физики.

В отличие от макроскопических частиц (песчинок, например) элементарные частицы, двигающиеся с релятивистскими скоростями, характеризуются двумя разными массами — массой покоя и релятивистской массой.

Что такое масса в классической механике? Это мера инерции тела. Чем она больше, тем медленнее ускоряется тело под действием заданной силы. Движение медленной частицы, тела описывается уравнением Ньютона:

$$F = ma,$$

где F — действующая на тело сила; m — масса тела и a — ускорение. Масса тела здесь величина постоянная. В теории относительности этой величине соответствует именно масса покоя. Уравнение Ньютона применяется, когда скорости движения тел намного меньше скорости света. Когда скорости достигают релятивистских значений, принцип относительности (то есть независимости законов движения, а в общем случае и всех физических законов, включая уравнения электродинамики, от выбора системы координат и времени) также сохраняется. Этот принцип является первым постулатом так называемой специальной теории относительности. Он сформулирован

* В приложении приведена таблица с датами и указанием способов открытия основных элементарных частиц.

великим французским физиком и математиком А. Пуанкаре в работах 1900—1904 годов и стал теоретическим обобщением отрицательных результатов многих опытов, поставленных, чтобы обнаружить влияние движения Земли на протекающие на ней процессы. В частности, таким опытом был знаменитый опыт 1881 года американского физика А. Майкельсона по поиску так называемого эфирного ветра.

В физике Ньютона пространство и время были, как нам известно из школьного курса физики, абсолютными, неизменными и независимыми категориями, и стало быть, уравнение Ньютона сохраняло свой вид при переходе от одной системы отсчета координат к другой без преобразования времени. Иное дело — уравнения Максвелла, описывающие все электродинамические процессы, в том числе и распространение света. Они уже не обладают таким свойством. Вид этих уравнений остается неизменным только в том случае, если при переходе от одной системы отсчета к другой преобразуются не только координаты, но и время. Закон преобразования координат и времени при релятивистских скоростях сформулирован Х. Лоренцем.

Но что при этом происходит с уравнением Ньютона? Оказывается, что оно сохраняет свой вид, если фигурирующая в уравнении масса частицы, ее мера инерции, становится функцией скорости. А прежнее значение массы, называемой в специальной теории относительности массой покоя, появляется в уравнении только при малых скоростях по сравнению со скоростью света. Теперь уже выводимое из уравнения Ньютона ускорение частицы под действием постоянной силы не будет постоянным, оно уменьшается с ростом скорости из-за увеличения массы. Инерция возрастает, причем тем больше, чем выше скорость движения, так что скорость частицы никогда не может превысить скорости света.

Так благодаря специальной теории относительности у частицы появилась еще одна масса, которую назвали релятивистской, или полной массой. Специальная теория относительности устанавливает связь между релятивистской массой и массой покоя: первая переходит во вторую при нулевой скорости.

Физики часто используют систему единиц, в которой скорость измеряется в долях от скорости света. В этой системе, называемой естественной, скорость света можно

положить равной единице во всех формулах. Тогда согласно специальной теории относительности релятивистская масса просто равна полной энергии частицы, а квадрат релятивистской массы равен сумме квадратов массы покоя и импульса (импульс в специальной теории относительности определяется как произведение скорости на релятивистскую массу).

Если изучают движение частицы, то пользуются полной массой. Однако в таблицах элементарных частиц всегда приводится масса покоя — постоянная величина для каждой частицы.

Опыт показывает, что масса покоя фотона равна нулю. Масса покоя нейтрино тоже считается нулевой, но не исключено, что у нейтрино все-таки есть масса — она не превышает, по-видимому, 46 электронвольт, то есть меньше десятичной доли массы электрона (подробнее о массе нейтрино рассказывается ниже). У всех остальных частиц масса покоя отлична от нуля.

Век частиц

В 1905 году Эйнштейн обнаружил, что введенные Лоренцем преобразования систем отсчета естественным образом возникают, если принять, что скорость света не зависит от движения источника. Это стало вторым постулатом специальной теории относительности (после принципа относительности).

Из положения о постоянстве скорости света во всех системах отсчета вытекает непосредственно вывод о зависимости течения времени от скорости движения. Оказывается, время движущейся частицы течет медленнее, чем покоящейся. Время жизни частицы в состоянии покоя и есть ее настоящая характеристика. Время жизни движущейся частицы пропорционально отношению полной массы частицы к массе покоя.

Время жизни элементарных частиц может находиться в следующих пределах: минимальное — это триллионная доля от триллионной части секунды (столько живут «мотыльки» микромира — частицы в возбужденном состоянии); максимальное — до бесконечности (таким временем жизни обладают так называемые стабильные частицы — фотон, электрон, нейтрино, протон). Все мезоны и гипероны (тяжелые частицы, их масса больше массы протона и нейтрона, из которых, как мы знаем, состоят ядра атомов, поэтому их называют нуклонами

от латинского *nucleus* — ядро) — нестабильные частицы со временем жизни (в состоянии покоя), равным миллиардным долям секунды.

Не следует путать время жизни частицы с ее временем жизни, в течение которого за частицей можно «наблюдать». Первая величина удобна своим постоянством для каждой элементарных частиц; вторая, релятивистская, определяет время жизни в обычном, «житейском», понимании хода времени. Рождающиеся с энергией в несколько миллиардов электронвольт частицы пролетают свои расстояния именно за это время.

Интересное свойство времени жизни частицы — его статистический характер. Таким свойством обладает и время жизни биологических организмов. Так, время жизни человека как вида — около 70 лет (по крайней мере в этом веке в развитых странах). Но это средняя величина. Чем больше обследовано людей, тем точнее будет определено среднее время жизни человека как вида. Сколько проживет на свете какой-либо конкретный человек, предсказать нельзя. Но можно вполне определенно говорить о средней продолжительности жизни людей в стране, группе стран и т. д. Это очень важная и полезная для общественных наук характеристика.

Время жизни частиц — тоже их средняя характеристика. Когда частиц одного сорта много (в пучках частиц их миллионы и даже триллионы), то можно с уверенностью сказать, что через время, равное среднему времени их жизни, количество частиц в пучке уменьшится за счет распада частиц в e раз*.

Физики используют также понятие периода полураспада. Его величина составляет 70 процентов от времени жизни. Период полураспада — это такое время, за которое распадается половина какого-то количества частиц. Если, например, период полураспада равен 1 секунде, то распад частиц происходит по такому закону: через 1 секунду распадется половина частиц, через 2 секунды число нераспавшихся частиц уменьшится в 4 раза, через 3 секунды в пучке останется только восьмая часть первоначального количества частиц... Это экспоненциальный закон распада.

* e — число Непера (названо так по имени шотландского математика Д. Непера). Оно примерно равно 2,72 и используется как основание натуральных логарифмов.

Число нераспавшихся частиц никогда не уменьшается до нуля. Из миллиарда частиц в пучке могут всегда найтись такие, которые проживут в 20 раз дольше, чем среднее время жизни частиц данного сорта. Ничего подобного не происходит в биологических системах. Время жизни отдельных индивидуумов может превышать среднее время жизни вида не больше чем в несколько раз (у человека не более чем в два раза, хотя людей тоже миллиарды). Это связано с тем, что только для частиц действителен закон экспоненциального распада.

Кванты и волны

Этому разделу можно предпослать слова философа XVIII века П. Бейля: «...Воззрение, будто взгляд, переходящий из века в век, от поколения к поколению, не может быть всецело ложным, — чистейшая иллюзия»*.

Уже говорилось о том, что представление о квантовых свойствах света введено в современную физику Планком и Эйнштейном. Это революционное открытие в физике, науке с устоявшимися понятиями, нашло много противников. От авторов потребовалось большое мужество, чтобы выступить против общепринятых представлений о физических параметрах как непрерывных величинах. «...Одно из моих основных и наиболее достоверных положений — это то, что природа никогда не делает скачков. Я назвал это законом непрерывности» — так было сформулировано это представление великим немецким математиком Г. Лейбницем**. Именно для непрерывных величин Ньютоном и Лейбницем были развиты дифференциальные и интегральное исчисления.

Гипотезы Планка и Эйнштейна подрывали самые основы физики — ее представления и математическое описание.

Чего это Планку стоило, можно судить по такому его признанию: «Горьким испытанием в моей научной жизни являлось то, что лишь изредка мне удавалось, а точнее, никогда не удавалось получить всеобщее признание какого-нибудь нового утверждения, правильность которого я мог бы доказать совершенно строго, но теоретически... При этом я смог установить один, по моему мнению, замечательный факт. Обычно научные истины побеждают не так, что их противников убеждают, и они

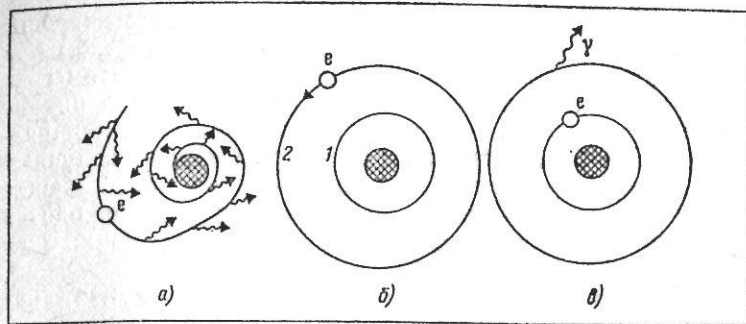


Рис. 2. Классическая электродинамика требует, чтобы электрон, вращаясь на орбите вокруг ядра, непрерывно излучал фотоны и в конце концов упал на ядро (а); Бор предложил модель атома, согласно которой электрон может находиться только на замкнутой орбите и при движении по ней излучать не должен (б); только при переходе на более близкую к ядру орбиту, не полностью занятую электронами, электрон испускает фотон (в).

признают свою неправоту, а большей частью так, что противники эти постепенно вымирают, а подрастающее поколение усваивает истину сразу»*.

По-видимому, чем революционнее новая теория, тем больше противников у нее и тем труднее она пробивает себе дорогу. «В 80-х и 90-х годах прошлого столетия я на самом себе испытал, как трудно исследователю, когда он сознает, что обладает идеями, объективно превосходящими господствующие идеи, но все аргументы не производят впечатления, так как его голос слишком слаб, чтобы заставить научный мир прислушаться к нему. Тогда нельзя было восстать против авторитета таких людей, как Вильгельм Оствальд, Эрнст Мах» — писал в 1933 году Планк в статье «Происхождение и влияние научных идей»**.

В 1913 году идею Планка о прерывности энергетических состояний излучающих систем датский физик Н. Бор распространил на атом. До Бора считалось, что электрон вращается в атоме по орбите, и так как на него действует ускорение (центростремительное), то он непрерывно излучает энергию в виде света. Потеряв полностью энергию, электрон должен обязательно упасть

* Единство физической картины мира. М., Наука, 1966, с. 11.

** Там же, с. 188.

* Антология мировой философии. Т. 2. М., Мысль, 1970, с. 487.

** Там же, с. 472.

на ядро. Это было основное логическое противоречие планетарной модели атома в том ее виде, в каком она была предложена Резерфордом. Реальные атомы на самом деле вполне стабильны, и электроны в них не «падают» на ядро. Бор разрешил это противоречие, предположив, что вращающиеся в атоме электроны излучают только при скачкообразном переходе на более низкие энергетические уровни, а до такого перехода находятся в одном из дискретных энергетических состояний и не излучают (рис. 2).

Классическая электродинамика имела дело только с непрерывными физическими величинами; в тех же областях, где эти величины оказались по самой своей природе дискретными, то есть принимающими отдельные числовые значения, классическая электродинамика теряла силу. Модель атома, разработанная Бором, объяснила устойчивость реального атома. Энергетические уровни в боровской модели можно было просто перенумеровать, начиная с низшего.

Пытаясь понять смысл постулата Бора о стационарных орбитах электрона в атоме, на которых энергия электрона удивительнейшим образом определяется целыми числами, французский теоретик Л. де Бройль обратил внимание на то, что с целыми числами обычно приходится иметь дело в физических задачах на колебания, при описании стоячих волн, явлениях интерференции. Это связано с периодичностью этих явлений и описывающих ее тригонометрических уравнений. Например, решение уравнения $\sin ax = 0$ будет $x = n\pi/a$, где n — целые числа от 0 до бесконечности. Ну а поскольку свет обладает волновыми свойствами, то, по мнению де Бройля, и электрон в атоме также обладает волновыми свойствами. Поэтому орбиты электрона в атоме — это просто стоячие волны, как бы захваченные ядром. В 1924 году де Бройль пошел еще дальше, он высказал мысль о том, что все частицы обладают волновыми свойствами и могут вести себя в одних опытах как частицы, а в иначе поставленных опытах — как волны.

Используя идею об образовании электроном в атоме стоячей волны и то, что на электрон в атоме действуют две противоположно направленные силы — кулоновская сила притяжения (частицы с разноименными зарядами притягиваются) и центробежная отталкивающая сила, де Бройль рассчитал спектр излучения атомов, извест-

ный из экспериментов. Этот выдающийся количественный результат вселил в де Бройля полную уверенность в правильности его пути (на физиков количественные согласия между теорией и опытом всегда производят большое впечатление).

Будущее показало достоверность гипотезы де Бройля. Однако первоначально она не встретила поддержки физиков и могла быть заброшена на годы, если бы не счастливая случайность, о которой расскажем чуть ниже. Против гипотезы «сработал» обычный в науке консерватизм: ученые меняют точку зрения только в случае крайней необходимости, под давлением фактов. Именно благодаря консерватизму удается построить прочное здание науки. Новые знания, как правило, не разрушают его, а достраивают или перестраивают. Гипотеза де Бройля требовала от физиков изменения принятого представления об объективном различии между частицами и волнами как разными формами материи. Физики плохо понимали дуализм света, а тут де Бройль распространяет его на все частицы!

Чистейшая случайность помогла идее де Бройля приобрести «права гражданства». В 1927 году физики из лаборатории фирмы «Белл-телефон» в Нью-Йорке К. Дэвисон и Л. Джермер опубликовали статью, в которой описали результаты своего изучения углового распределения электронов, рассеянных мишенью из никеля. Обычно в таких опытах использовалась мишень из поликристаллического никеля, и электроны на нем рассеивались равномерно во все стороны. Но вот случилась авария — взорвался сосуд с жидким воздухом, мишень окислилась. Чтобы ее восстановить, пришлось поликристаллический никель продолжительное время прогревать при высокой температуре, а это привело к изменению его структуры — произошла рекристаллизация: вместо множества мелких кристаллов образовалась совокупность больших кристаллов. И картина углового распределения рассеянных на мишени электронов принципиально изменилась. Число рассеянных электронов стало сильно зависеть от угла рассеяния, появились «максимумы» и «минимумы» в угловом распределении. Новая картина углового распределения электронов напоминала дифракцию и интерференцию на кристалле рентгеновских лучей определенной длины волны. Иными словами, электрон здесь повел себя как волна!

Может возникнуть вопрос: выходит, если бы не случайность, не авария в лаборатории фирмы «Белл-телефон», то волновые свойства электрона не были бы открыты? Рано или поздно были бы все равно открыты. Когда в науке назревает критическая ситуация — накапливается несколько экспериментальных фактов, находящихся в видимом логическом противоречии между собой или с принятыми теоретическими положениями, — начинается разностороннее теоретическое и опытное исследование противоречий, и всегда изучаемый предмет поворачивается перед исследователями новыми гранями, позволяющими разрешить возникшие трудности.

Итак, относительно электрона гипотеза де Бройля оказалась верной. А относительно всех других частиц?

В 1930 году немецкий физик О. Штерн и его сотрудники в опыте по рассеянию пучков молекул гелия, водорода на кристаллах фторида лития наблюдали явление дифракции. Отсюда следовало, что не только электроны, но и молекулы обладают волновыми свойствами. С тех пор гипотеза де Бройля подтвердилась и в опытах по рассеянию протонов, нейтронов, мезонов. Так, при рассеянии протонов или мезонов высокой энергии на протоне-мишени оказалось, что точно в направлении вперед за мишенью число рассеянных частиц максимальное. Это и есть явление дифракции. Гипотеза де Бройля о волновых свойствах у всех частиц сейчас доказана с несомненностью.

Особые приметы частиц — квантовые числа

Несмотря на оппозицию многих ведущих физиков, идею де Бройля энергично подхватил тогда молодой немецкий теоретик Э. Шредингер. Идею де Бройля он понимал в том смысле, что движение материальной точки (элементарной частицы) в пространстве должно изображаться волновым процессом. В математике волновому движению отвечает некоторая функция координат и времени, называемая волновой. Шредингер составил для нее уравнение, которое стало основным в квантовой механике и получило его имя. Параметрами в уравнении являются энергия и импульс.

Если микросистема находится в ограниченной области пространства, как, например, электрон в атоме, то уравнение Шредингера имеет решение только при определенных значениях энергии и импульса. Это и есть

дискретные, или, иначе, квантовые, энергетические состояния физической системы микрочастиц. Математически они возникают вследствие наложения на решение уравнения условия на границе той части пространства, которую занимают частицы. Например, пусть описывающая волновое движение волновая функция имеет вид $\sin pr$, где p — импульс. Эта функция должна обращаться в нуль на границе атома — в точке на расстоянии $r=a$ от начала координат (за нее берут центр атома). Тогда граничное условие имеет вид $\sin pa=0$. Решение этого уравнения будет для импульса следующим: $p=n\pi/a$, где n — это любое целое число. То есть импульс электрона оказывается в атоме квантованным, состоящим из «порций», или, как говорят физики, он принимает дискретные значения (а не непрерывные, как в классической физике). Таким образом Шредингер нашел дискретные уровни электрона в атоме водорода. Уравнение Шредингера решается для каждого значения энергии, являющейся параметром. Если перенумеровать все значения энергии, при которых уравнение имеет решение, то номера будут характеризовать энергетические состояния частиц. Эти числа называют квантовыми числами. А поскольку характеристика по энергетическому состоянию основная, главная, то и соответствующее ему квантовое число тоже называется главным. Энергия замкнутой системы микрочастиц сохраняется во времени, а потому и квантовые числа — сохраняющиеся свойства частиц, их особая примета.

Каждую систему частиц можно охарактеризовать набором квантовых чисел, и только некоторым из них соответствуют непрерывные сохраняющиеся величины в классической механике. Например, энергии системы отвечает главное квантовое число, моменту количества движения — орбитальное квантовое число.

Важное квантовое число для каждой частицы — это спин (от английского *spin* — вращаться). Спин — одна из самых трудных, пожалуй, для понимания характеристик элементарной частицы. Чаще всего для объяснения спина привлекают аналогию, уподобляя его моменту количества движения частицы, вращающейся вокруг собственной оси (пример — волчок). Если волчок отклонять от вертикальной оси, то он будет вращаться при любом (относительно небольшом, конечно) угле наклона оси вращения к вертикали. Мы бы очень удивились, если

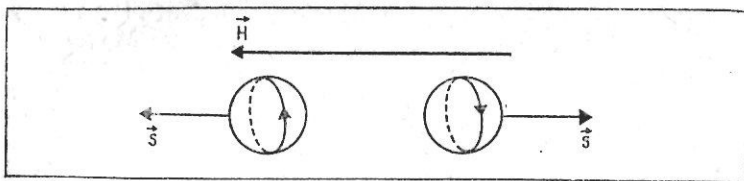


Рис. 3. Спин электрона в магнитном поле направлен либо по, либо против поля (электрон может «вращаться» только вокруг своей оси, направленной вдоль вектора напряженности поля \vec{H}).

бы вдруг обнаружили, что волчок вращается при одних углах наклона к вертикали и не вращается при других. Это означало бы, что угловой момент собственного вращения волчка не есть непрерывная величина, а прерывистая, дискретная. Именно так и обстоит дело в квантовой механике с микрочастицами. Спин принимает только дискретные значения (рис. 3). В единицах введенной Планком постоянной спин элементарных частиц равен 0 или $1/2$, редко 1 и $3/2$. Спин пиона равен 0, то есть пион «не вращается» вокруг собственной оси. Спин фотона равен 1; спин электрона, мюона или протона и нейтрона равен $1/2$. У короткоживущих частиц — порядка 10^{-23} секунды — спин бывает равен 1 или $3/2$, а иногда доходит и до 6. В микромире это быстро вращающиеся частицы.

К дискретным квантовым числам относится и такая важная характеристика, как электрический заряд частиц. Для всех частиц, кроме самых короткоживущих, электрический заряд, измеряемый в единицах заряда электрона, равен нулю или единице с положительным или отрицательным знаком. Только у нескольких короткоживущих частиц он равен 2. Почему электрический заряд дискретен и равен заряду электрона — одна из неразгаданных до сих пор тайн микромира.

О других квантовых числах (характеристиках) расскажем в следующих разделах, а сейчас узнаем о том, что может происходить с частицами.

Превращения бесконечно малых

Помимо физических величин, описывающих свойства микрообъектов в отдельности, элементарные частицы различаются еще по типу взаимодействия с остальными своими собратьями. Это аналогично тому, как и человек, помимо внешнего вида — роста, веса, походки, цвета

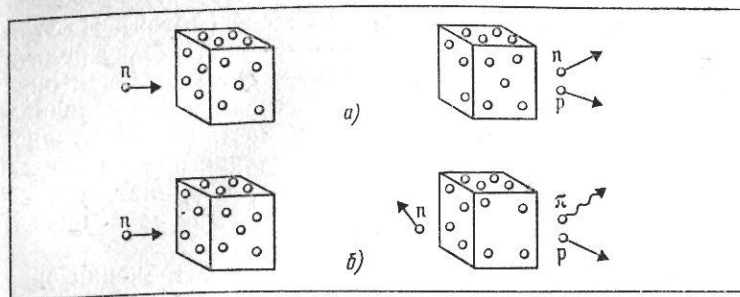
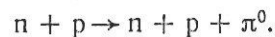


Рис. 4. Схема упругого рассеяния нейтрона на протоне мишени — нейтрон выбил протон, и оба они вылетели из мишени (а); схема взаимодействия нейтрона с протоном мишени, когда из мишени вылетают не только нейтрон и протон, но родившийся в этой реакции пи-мезон (б).

волос и глаз, еще обладает характером, который проявляется во взаимоотношениях с другими людьми.

Взаимоотношения элементарных частиц выявляются при соударениях частиц в реакциях. Именно тогда они вступают во взаимодействие между собой.

Каждую конкретную реакцию изображают в виде соединенных стрелкой сумм начальных и конечных частиц в реакции. Слева записывают начальные частицы, а справа — конечные, стрелка указывает направление реакции. Например, рассеяние нейтрона на протоне с рождением пиона записывается в виде



Упругим рассеянием называется столкновение частиц без изменения их состояния, меняются лишь кинетическая энергия и угол разлета частиц. Реакция — это превращение сталкивающихся частиц, в которых меняется состояние хотя бы одной из них (ее внутренняя энергия или квантовое число) или рождаются новые частицы (рис. 4).

В реакциях выполняются законы сохранения квантовых чисел, релятивистских энергии и импульса. Закон сохранения энергии, например, требует, чтобы масса покоя распадающейся частицы была больше суммы масс покоя продуктов распада. Даже быстро летящая частица, обладающая сколь угодно большой релятивистской массой, не может распасться на две частицы, если не выполняется это требование. По этой же причине не могут

распадаться частицы с нулевой массой (фотон). Из этого примера видна принципиальная разница между релятивистской массой и массой покоя частицы. Первая определяет движение частицы и все механические величины, вторая «заведует» превращением частицы. Релятивистская масса — относительная характеристика частицы и зависит от выбора системы отсчета координат, а масса покоя — абсолютное свойство частицы, не зависящее от наблюдателя.

Необходимость выполнения закона сохранения энергии приводит к существованию «порога» у многих реакций — той минимальной кинетической энергии сталкивающихся частиц, при которой их суммарная релятивистская масса превышает сумму масс покоя продуктов реакции, и реакция может идти. Например, при бомбардировке ускоренными протонами водородной мишени порог рождения пары протон-антипротон равен 5,6 гигаэлектронвольта. Предельная энергия ускорения протонов на Серпуховском ускорителе (76 гигаэлектронвольт) — пороговая для рождения частицы максимальной массы в 12 гигаэлектронвольт при соударении протонов с водородной мишенью.

Чтобы в подобных реакциях могли рождаться все более тяжелые частицы, нужно было увеличить энергию ускоряемых частиц, сообщить им большую кинетическую энергию (или релятивистскую массу).

Когда ускоренная частица налетает на мишень, то она либо вступает в реакцию с ядрами мишени, либо пролетает сквозь нее, либо просто «застревает» в ней, не вступив в реакцию. Какая из этих возможностей реализуется на практике, характеризуется вероятностью реакции. Вероятность конкретного процесса рассчитывается как отношение числа вступивших в реакцию частиц к общему числу падающих на мишень ускоренных частиц. Вероятность — это статистическая величина, определяемая, как уже говорилось, тем точнее, чем больше число испытаний, то есть упавших на мишень частиц.

Определение вероятности каждой реакции — это и есть основная динамическая задача, решаемая в физике элементарных частиц средствами теории и эксперимента.

По величине вероятности реакции делятся на четыре класса, соответствующих четырем известным в физике типам взаимодействий элементарных частиц. Электро-

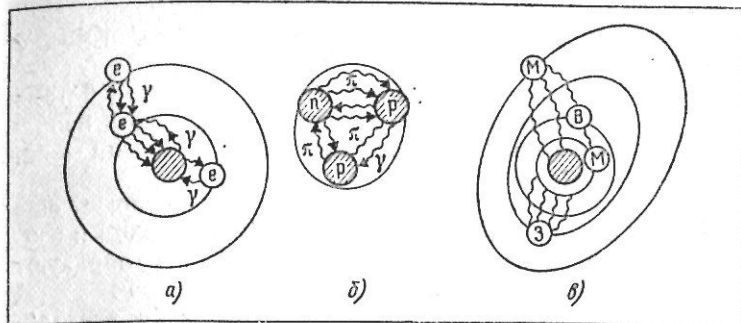


Рис. 5. Электрон и ядро в атоме постоянно обмениваются виртуальными (ненаблюдаемыми) фотонами; именно поэтому атом и существует в виде системы (а); ядро гелия-3: нуклоны в нем взаимодействуют посредством обмена пионами, что обуславливает существование ядер, протоны взаимодействуют также посредством обмена фотонами (б); гравитационное взаимодействие Солнца и планет осуществляется посредством непрерывного обмена гравитонами — квантами поля тяготения (в).

магнитное взаимодействие действует между всеми заряженными частицами, слабое ответственно за распады частиц и ядер, сильное — за ядерные силы, связывающие нейтроны и протоны в ядре, и, наконец, гравитационное действует между всеми частицами, имеющими массу, и макроскопическими телами.

Обратите внимание на различие в названиях взаимодействий. Названия электромагнитного и гравитационного взаимодействия связаны с тем, что частицы обладают соответственно зарядом и массой. Иное дело — сильные и слабые взаимодействия. Они, можно сказать, по своему смыслу количественные. В этих названиях отражена величина вероятности управляемых этими взаимодействиями ядерных процессов. Сильное взаимодействие обуславливает наибольшую вероятность превращений частиц. Связывающее положительно заряженное ядро и электрон в атоме электромагнитное взаимодействие приводит к рассеянию частиц под большими углами с вероятностью в тысячи раз меньшей, чем сильное взаимодействие. Вероятности распадов частиц еще в триллионы раз меньше, что и приводит к относительно большому времени жизни этих частиц по сравнению с временами, характерными для ядерных процессов. Гравитационное взаимодействие обуславливает силы тяготения между всеми частицами. Оно еще слабее в триллионы триллио-

нов раз. В физике частиц его обычно не учитывают, хотя для устранения логических трудностей теории оно может оказаться существенным.

По современным представлениям взаимодействия между частицами осуществляются посредством непрерывного испускания и поглощения других частиц — переносчиков взаимодействий.

Сильновзаимодействующие частицы, которые еще называют адронами, обмениваются таким образом и взаимодействуют с помощью мезонов. Мезоны образуют вокруг адронов мезонное поле.

Заряженные частицы создают вокруг себя электромагнитное поле, кванты которого — фотоны (рис. 5).

Предсказанный четверть века назад переносчик слабого взаимодействия открыт лишь в 1983 году. У него три зарядовых состояния: дубль-в-минус- и дубль-в-плюс-бозоны и нейтральный зет-бозон (буквенное их обозначение соответственно W^- , W^+ , Z). Их еще называют промежуточными бозонами, что отражает наличие у них целого спина 1 и роль во взаимодействии частиц (бозонами по имени индийского физика Ш. Бозе называют частицы с целым спином, а фермионами по имени итальянского физика Э. Ферми — с полуцелым).

Переносчик гравитационного взаимодействия — гравитон — еще не открыт.

Из законов сохранения энергии и импульса следует, что частица не может испустить или поглотить фотон или другую частицу без изменения своей энергии. Для свободных элементарных частиц, находящихся обычно в низшем энергетическом состоянии, это означает невозможность испускания или поглощения частицы. Например, пусть электрон испустит квант. В покоящейся относительно электрона системе отсчета импульс электрона до испускания фотона равен нулю, а энергия — массе покоя. Но в результате испускания фотона суммарная энергия конечных электрона и фотона становится уже больше массы покоя электрона. Получается, что закон сохранения энергии нарушается при испускании квантов свободной частицей. Такое же рассуждение верно и для испускания нуклонов пионов. Поэтому такие процессы не реализуются в природе.

Однако квантовая механика допускает возможность кратковременного испускания кванта и его последующего поглощения частицами. Такие кванты нельзя непосред-

ственно зарегистрировать приборами, но они проявляются в реакциях с частицами. Кванты-призраки называются виртуальными. Их существование приводит к наличию вокруг заряженной частицы электромагнитного поля — поля виртуальных фотонов. Точно так же и вокруг нейтрона или протона возникает мезонное поле, состоящее из виртуально испускаемых и поглощаемых нуклонами мезонов (например, в ядре). В 1968—1976 годах было теоретически показано, что хотя виртуальные частицы не регистрируются приборами, они могут испускать в реакциях фотоны с энергией, равной разности масс покоя участвующих в реакции реальных частиц и самих виртуальных частиц. Это теоретическое предсказание в 1981 году было подтверждено экспериментаторами из МГУ*.

Существование виртуальных частиц обусловлено одним из важнейших законов квантовой механики — так называемым соотношением неопределенностей, выведенным крупнейшим немецким физиком-теоретиком В. Гейзенбергом. Оно и носит его имя. Согласно этим соотношениям энергия физической системы может не сохраняться на произвольную величину, равную энергии испускаемого кванта (частицы), но на время, меньшее чем отношение введенной Планком постоянной \hbar к величине испущенной энергии**. Если энергия кванта мала, что характерно для безмассовой частицы — фотона, то и время испускания с последующим поглощением может быть большим. За это время фотон успеет не только оторваться от испустившей его частицы, но и улететь от нее на необычайно большое расстояние. Так, виртуальные фотоны образуют вокруг заряженной частицы бесконечно протяженное электромагнитное поле.

Совсем по-другому обстоит дело с испусканием нуклонами мезонов (пионов), имеющих массу покоя 140

* Дубовой Э. И., Шапиро И. С. Внутреннее тормозное излучение и идентификация механизма бинарных прямых реакций. — Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики, 1968, т. 8, вып. 4, с. 216; Дубовой Э. И. О возможности существования узких γ -линий в тормозном спектре электронов. — Известия АН СССР. Серия физическая, 1976, т. 40, № 6, с. 1143; Ишханов Б. С., Пискарев И. М., Новиков Ю. А. Радиационные переходы, сопровождающие фоторасщепление лития. — Ядерная физика, 1981, т. 33, вып. 1, с. 28.

** Постоянная Планка \hbar равна $6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг-секунды, или $6,62 \cdot 10^{-34}$ джоуль-секунды. Часто применяется величина h , деленная на 2π и составляющая $1,05 \cdot 10^{-34}$ джоуль-секунды. Она обозначается как \hbar .

мегаэлектронвольт. Согласно соотношению Гейзенберга такой виртуальной энергии отвечает время, меньшее чем 10^{-23} секунды. Даже при движении со скоростью, близкой к скорости света, пион отойдет от испустившего его нуклона на расстояние не большее, чем 1 ферми (десяти-триллионная доля сантиметра). Это и есть размеры мезонного «облака» — поля вокруг нейтронов и протонов. Соотношением Гейзенберга руководствовался Юкава, оценивший, исходя из малых размеров ядер и нуклонов (порядка 1 ферми), массу пиона.

Поскольку масса покоя гравитона — кванта поля тяготения — предполагается нулевой, то и поле тяготения должно простирается до бесконечности.

Масса промежуточного бозона, открытого в 1983 году, — около 90 гигаэлектронвольт. Такой большой энергии отвечает возможность его виртуального испускания на расстоянии порядка 10^{-16} сантиметра. Это в тысячи раз меньше размеров мезонного поля вокруг нуклонов.

Странность элементарных частиц

В 1947 году в опытах по исследованию космических лучей с применением камеры Вильсона был открыт класс реакций, сопровождающихся рождением новых частиц К-мезонов (кратко называемых каонами) и гиперонов. Масса каонов составляет половину протонной массы, а гиперонов — более гигаэлектронвольта. Время жизни новых частиц оказалось порядка миллиардных долей секунды.

Особое свойство этих частиц — обязательно парное их рождение в реакциях. Либо рождаются два каона разных знаков заряда, либо гиперон и каон. Для объяснения этого свойства вновь открытых частиц американский физик М. Гелл-Ман и независимо от него японский физик К. Нишиджима приписали им новое квантовое число — странность. Странность принимает значение минус единица (-1) для частиц и плюс единица ($+1$) — для их античастиц. Необходимостью сохранения в реакциях этого квантового числа и объясняется парное рождение частиц, названных странными.

Но почему такое отнюдь не научное определение — странность? Вероятно, потому, что не нашлось другого слова для обозначения необычного поведения вновь открытых частиц (физики еще не единожды обратятся к «ненаучным» обозначениям вполне научных понятий —

об этом речь пойдет дальше). Дело в том, что странные частицы повели себя по-особому, не так, как это представлялось физикам. Необычность их в том, что в распадах странных частиц странность не сохраняется. Каждый гиперон и каон распадается на более легкие частицы с сохранением всех квантовых чисел — энергии, импульса, спина, кроме странности:

$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-,$$

$$\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0.$$

Странность частиц в левой части отлична от нуля, а в правой равна нулю. Почему же закон сохранения странности носит такой частный характер, то есть выполняется в реакциях с рождением частиц и нарушается в распадах? Это можно объяснить только тем, что «управляющее» рождением частиц сильное взаимодействие сохраняет странность, а «заведующее» распадами слабое взаимодействие нет. Однако причина этого различия во взаимодействиях физикам еще неясна.

Заряд тяжелых частиц

В 1949 году американский физик и математик Ю. Вигнер впервые поставил вопрос: если электромагнитному взаимодействию заряженных частиц соответствует закон сохранения электрического заряда, то нет ли аналогичного закона сохранения для ядерного взаимодействия нейтронов и протонов — тяжелых частиц? Основания для такого предположения давал опыт: в физике элементарных частиц существуют все виды превращений, кроме запрещенных законами сохранения. Так, закон сохранения электрического заряда запрещает электрону распадаться на нейтральные нейтрино и фотон. А что мешает распасться протону на позитрон и фотон? Отсутствие распада протона — необходимое условие для стабильности вещества: ведь протоны — составная часть ядер атомов.

Проанализировав опыты с реакциями, в которых участвуют нейтроны и протоны, Вигнер убедился, что суммарное число этих двух известных в то время тяжелых частиц сохраняется в реакции. Это число назвали новым типом заряда — нуклонным, а нейтрон и протон стали рассматривать как разновидности одной частицы — нуклона (см. с. 16—17).

В начале 50-х годов сперва в космических лучах, а

затем и на ускорителях открыли новый класс тяжелых частиц — гипероны, а затем и антипротоны. Выяснилось, что уже суммарное число нуклонов в реакциях не сохраняется, так как могут рождаться гипероны. Тогда понятие нуклонного заряда обобщили так, чтобы новым зарядом, который назвали барионным (от греческого слова в латинской транскрипции *barys* — «тяжелый»), обладали все тяжелые частицы. Его значение выбрали равным плюс единице (+1) для нуклонов и гиперонов, минус единице (—1) — для их античастиц. Барионный заряд сохраняется во всех известных реакциях. Частицы, обладающие барионным зарядом, называют теперь барионами. Это все тяжелые частицы. Мезоны, фотоны, все легкие частицы (электрон, мюон, нейтрино) не имеют барионного заряда.

Вигнер развил дальше аналогию между электрическим и барионным зарядом. Известно, что электромагнитное взаимодействие универсально, оно для каждой заряженной частицы характеризуется электрическим зарядом, всегда кратным заряду электрона, то есть, по существу, зависит от одной постоянной — электрического заряда электрона. Значение этой постоянной и определяет порядок величины вероятностей всех реакций, управляемых электромагнитным взаимодействием. В 1952 году Вигнер предположил, что и закон сохранения барионного заряда есть следствие существования единой постоянной, определяющей ядерное взаимодействие тяжелых частиц между собой и величину вероятности реакций между этими частицами. Это предположение действительно подтвердилось в последующих экспериментах на ускорителях: вероятности реакций с гиперонами оказались сравнимыми по величине с вероятностями реакций с нуклонами. Это доказало справедливость гипотезы о существовании связи между сохранением барионного заряда и универсальностью ядерного взаимодействия тяжелых частиц.

Теперь стало понятно, почему протон не распадается на более легкие частицы: потому что не существует более легкого бариона. Необходимость сохранения барионного заряда запрещает электрону в атоме с нуклоном ядра проаннигилировать, то есть, провзаимодействовав, превратиться в пару гамма-квантов.

Сохранение барионного заряда объясняет всегда парное рождение бариона и антибариона в реакциях и воз-

можность их взаимной аннигиляции: $p + \bar{p} \rightarrow \gamma + \gamma$ или $p + \bar{p} \rightarrow \gamma + \gamma$.

Однако в последнее десятилетие физики всерьез задумались над тем, а абсолютен ли закон сохранения барионов? Ведь не исключено, что и протон распадается, но так редко, то есть в среднем живет так долго, что такие распады не были обнаружены до сих пор. Однако об этом поговорим подробнее позже в специальном разделе, когда больше узнаем о взаимодействиях, в которых участвуют частицы.

ГЛАВА 3. НЕЙТРИНО И ЗАРЯД ЛЕГЧАЙШИХ ЧАСТИЦ

Проблема детектирования нейтрино и антинейтрино — этих космических конечных продуктов ядерных реакций и измерения их характеристик — вызов физике сегодня.

Ф. Рейнес, К. Коуэн

Открытие нейтрино

Эта глава посвящена свойствам лептонов — частиц со специфическим зарядом, лептонным. Само название «лептон» происходит от греческого слова в латинской транскрипции *leptos* — «легчайший, маленький».

После фотона легчайшая из известных частиц — это нейтрино (фотон к лептонам не относится по причинам, о которых скажем ниже). Попыты с достоверностью показывают, что масса покоя нейтрино если и не равна нулю, то по крайней мере в десятки тысяч раз меньше массы покоя электрона.

Существование нейтрино предположил в 1930 году швейцарский теоретик, один из творцов квантовой механики В. Паули, чтобы объяснить наблюдавшееся в опыте нарушение закона несохранения энергии в бета-распаде ядер. Бета-распад — самопроизвольное превращение в ядре нейтрона, сопровождающееся вылетом быстрого электрона и переходом нейтрона в протон, а ядра — в новое ядро с зарядом, большим на единицу. Наблюдается также бета-распад и свободного нейтрона (вне ядра) с вылетом протона, электрона и нейтрино (которое из-за несовершенства аппаратуры и его большой проникающей способности как раз и не обнаруживали в опытах по бета-распаду).

Из закона сохранения энергии следует, что если бы

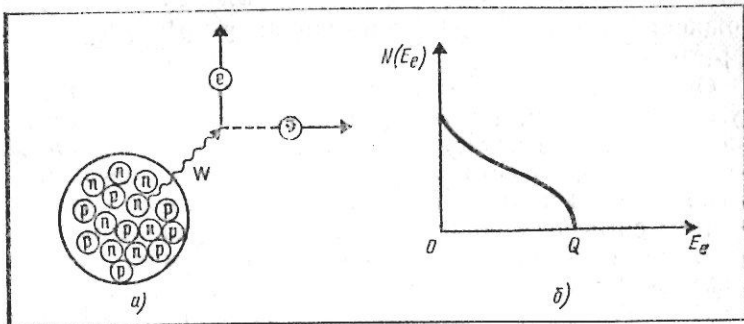


Рис. 6. Нейтрон в тяжелом ядре может распасться с образованием протона и вылетом W^- -бозона, немедленно превращающегося в электрон и антинейтрино (а); спектр электронов бета-распада ядра (б).

при бета-распаде ядра в веществе рождались только новое ядро и электрон, то всю выделившуюся энергию Q , равную разнице масс начального и конечного ядра, уносил бы электрон. Измерения же показали, что энергия электронов в бета-распаде — отнюдь не какая-то определенная величина, а нечто как бы размазанное в интервале от массы покоя до упомянутой разницы масс Q (рис. 6). Дело выглядело так, будто здесь действительно нарушался закон сохранения энергии. Бор даже предположил, что в микромире такое возможно. Однако с этим согласиться было трудно.

Вероятнее всего, посчитал Паули, что в бета-распаде одновременно с электроном рождается нейтральная, слабо взаимодействующая с веществом частица, которую потому и не могли заметить. Она, эта частица, уносит часть энергии распада ядра. Крестным отцом частицы стал Ферми, назвавший ее нейтрино — маленьким нейтроном. Ферми — физик, одинаково сильный и как теоретик, и как экспериментатор, — разработал теорию бета-распада частиц и ядер. Этот тип превращений частиц объяснялся новым видом взаимодействий, названным слабым, поскольку для него характерны малые вероятности ядерных процессов по сравнению с большими вероятностями рассеяния других частиц и, наоборот, большое время жизни по сравнению с ядерными временами: для разных ядер оно составляет от десятых долей секунды до многих тысяч лет (типичный масштаб ядерного

времени — это время, нужное свету для прохождения размеров нуклона, равного 10^{-13} сантиметра, то есть примерно 10^{-23} секунды).

Прямое доказательство существования нейтрино принадлежит американским физикам Ф. Рейнесу и К. Коуэну, наблюдавшим в 1953 году реакцию, обратную бета-распаду свободного нейтрона:



Эксперимент был поставлен в Хэнфорде (США) на реакторе, в котором рождались нейтрино при бета-распаде осколков деления урана.

Предварительные расчеты вероятности такой реакции, проведенные еще в 1934 году, показывали, что в твердом веществе нейтрино с энергиями, характерными для бета-распада (несколько мегаэлектронвольт), будут проходить расстояния в сотни световых лет, прежде чем захватятся ядром. Напомним, что один световой год — это расстояние, проходимое светом за год, и оно равно 10 триллионам километров. В 30-х и 40-х годах обнаружение нейтрино было бы немыслимым делом. Это стало возможным только после создания мощных реакторов (с большим числом делящихся ядер в секунду) и нового типа детекторов частиц — сцинтилляционных, в которых пролетающая заряженная частица вызывает световую вспышку (о типах детекторов разговор у нас еще предстоит).

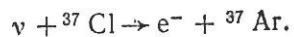
В опыте Рейнеса и Коуэна вблизи реактора устанавливался бак с жидким сцинтиллятором, содержащим также соли кадмия. Жидкий сцинтиллятор предназначался для регистрации гамма-вспышек.

Рейнес и Коуэн в этом эксперименте наблюдали две гамма-вспышки, разделенные временным промежутком в несколько микросекунд. Первую вспышку вызвал гамма-квант, образующийся при аннигиляции позитрона с каким-либо электроном вещества в баке; вторую — гамма-квант, выделяющийся при захвате нейтрона кадмием. Временной интервал между двумя вспышками возникал из-за того, что нейтрон эффективно захватывается ядрами кадмия только после замедления, которое и происходит несколько микросекунд. Этот эксперимент доказал однозначно существование потока нейтрино от реактора.

Один из важных вопросов, связанных с нейтрино,

можно сформулировать так: истинно ли нейтральна эта частица и не имеет античастицы или у нее есть античастица? Если есть, чем же тогда она отличается от самого нейтрино?

Еще до открытия нейтрино в опыте Рейнеса и Коуена, в 1946 году, Б. Понтекорво, ныне советский академик, предложил для экспериментального решения этого вопроса регистрировать превращения нейтрона в протон в атоме хлора под действием реакторных нейтрино. Такая реакция приводит к образованию атома радиоактивного аргона и вылету электрона:



Эта реакция обратна той, которую наблюдали Рейнес и Коуен; она не может идти, если нейтрино не тождественно антинейтрино. Такой опыт поставил в 1955 году американский физик Р. Девис. Бак, наполненный сотнями литров жидкого четыреххлористого углерода — перхлорэтилена, вырабатываемого в больших количествах химическим производством для чистки одежды, помещался вблизи реактора. Если бы реакция шла, то образовавшиеся атомы инертного газа аргона можно было извлечь продуванием сквозь жидкость гелия с последующим отделением от него аргона по радиоактивности.

Но не так-то просто обнаружить несколько атомов радиоактивного аргона в большой массе вещества. Это все равно, что искать иголку в стоге сена. Пришлось разработать специальные измерительные устройства с низким шумовым фоном используемых счетчиков радиоактивного излучения аргона (рентгеновского кванта и электрона). Достоверность определения атомов аргона проверялась на пробных количествах этих атомов, специально вводимых в резервуар с жидкостью. В итоге удавалось выделить и измерить 90 процентов атомов аргона.

В этом опыте Девиса превращение атомов хлора в аргон под действием реакторных нейтрино не наблюдалось. Отсюда следовало, что нейтрино и антинейтрино не тождественны. Стало быть, есть все основания для введения нового квантового числа — лептонного заряда, сохраняющегося в реакциях.

Лептонный заряд

В 1952 году Г. Маркс из Института физики при университете имени Роланда Этвеша в Будапеште обратил внимание на то, что постоянная слабого взаимодействия одна и та же для процессов распада трех частиц — нейтрона, пи- и мю-мезона, идущих с образованием нейтрино, и для реакции захвата мюона ядром с превращением нейтрона в протон (или наоборот) также с образованием нейтрино. Это могло свидетельствовать только о том, что управляющее распадами слабое взаимодействие универсально. Как раньше Вигнер, исходя из универсальности ядерного взаимодействия, предположил, что у тяжелых частиц есть свой вид заряда — барионный, так и теперь Маркс высказал мысль, что универсальность слабого взаимодействия требует (или, наоборот, является следствием) существования у слабовзаимодействующих частиц нового типа квантового числа — лептонного заряда. Опыты Девиса, как уже было сказано, подтвердили нетождественность нейтрино и антинейтрино, они как раз и отличаются знаком этого заряда.

Лептонный заряд в начале реакции и в конце сохраняется, хотя вопрос о том, как определять лептонный заряд нескольких частиц, остается открытым. Это можно сделать двумя способами: либо суммированием лептонных зарядов (аддитивный закон), либо перемножением (мультипликативный закон). Решение этой проблемы ищут до сих пор в опытах с пучками нейтрино на ускорителях.

Электрону, нейтрино и отрицательно заряженному мюону приписан лептонный заряд плюс единица (+1), а их античастицам — заряд минус единица (—1). Добавим, что нейтрино и антинейтрино различаются не только знаком лептонного заряда, но и направлением спина относительно импульса: у антинейтрино он направлен по импульсу, а у нейтрино — против.

Только фотон, как уже говорилось, не имеет зарядов, только он истинно нейтральная частица, рождающаяся в реакциях в произвольном числе.

Первые опыты с пучками нейтрино на ускорителе

В 1959 году Б. Понтекорво теоретически показал возможность проведения экспериментов на пучках ней-

трино, получаемых с ускорителей частиц*. В этих опытах можно было решить новый возникший вопрос: все ли нейтрино одного типа или они принадлежат к разным типам и соответственно этому способны вызывать разные реакции?

Теоретически получалось, что могло быть два типа нейтрино — электронное и мюонное. Электронные нейтрино рождаются вместе с электроном или позитроном при бета-распаде. Мюонные же появляются при распаде пиона с образованием мюона: $\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$. Одним из доводов в пользу этого было то, что в природе отсутствовал разрешенный законом сохранения энергии и заряда распад мюона с образованием двух электронов и позитрона, либо двух позитронов и электрона (в зависимости от знака электрического заряда мюона). Вопрос можно было бы решить, если бы удалось выяснить экспериментальным путем, что мюонные нейтрино не способны вызывать реакцию $\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow e^+ + n$, которая наблюдается в опытах с заведомо электронными нейтрино на реакторе. Но пучков мюонных нейтрино еще не было. Расчеты Понтекорво как раз и показали: при той интенсивности пучка ускоренных протонов, которая в то время была вполне достижимой, можно было получать нужное количество пионов с последующим образованием нейтрино. Если использовать сцинтилляционный счетчик — мишень типа Рейнеса и Коуена весом в тонну, число регистрируемых событий на пучке мюонных нейтрино ожидалось в среднем одно за час работы ускорителя.

Такие нейтрино обязательно должны были вызывать реакцию $\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow e^+ + n$ с рождением мюона на протоне. Эта реакция имеет пороговый характер и идет только, если энергия нейтрино больше массы мюона, а именно 106 мегаэлектронвольт. Чтобы такая реакция произошла с достаточно большой вероятностью, необходимо было иметь начальную энергию протонов порядка 10 гигаэлектронвольт. Статья Понтекорво, посвященная этой проблеме, заканчивалась так: «Постановка опыта по выяснению тождественности мюонного и электронного нейтрино хотя и затруднительна, но должна быть серьезно рассмотрена при проектировании новых ускорителей».

* Понтекорво Б. М. О постановке опытов при помощи пучков нейтрино мезонной природы. — Журнал экспериментальной и теоретической физики, 1959, т. 37, с. 17—51.

В то время когда появилась статья Понтекорво, постановка предложенного им эксперимента казалась делом далекого будущего. Однако уже в 1962 году стали известны первые результаты нейтринного опыта на ускорителе в Брукхэйвене, в последующие два года появились результаты аналогичного исследования и в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) в Швейцарии (здесь используется сокращение по первым буквам названия организации на английском языке). Будущее приблизилось гораздо быстрее, чем можно было ожидать, благодаря появлению ускорителей на большие энергии протонов — 33 гигаэлектронвольта в первой лаборатории и 28 гигаэлектронвольт во второй, а также созданию нового типа детекторов частиц — искровой камеры.

В экспериментах пучок ускоренных до 15 гигаэлектронвольт протонов направлялся на бериллиевую мишень, расположенную внутри вакуумной камеры ускорителя. Рождавшиеся пионы распадались на мюоны и нейтрино или антинейтрино в зависимости от знака электрического заряда пиона. Мюоны задерживались 14-метровым слоем железа. Оставшийся после прохождения этой массы металла поток антинейтрино и нейтрино вызывал реакцию с рождением мюона, который регистрировался 10-тонной искровой алюминиевой камерой. Вдоль следа мюона проходила в камере искра, которая и регистрировалась приборами. Искровая камера — это одновременно и мишень для нейтрино, и детектор образующихся в реакции мюонов. В день регистрировалось несколько случаев реакции. Электроны в реакциях на мюонных нейтрино и антинейтрино не наблюдались. Так была установлена нетождественность электронного и мюонного нейтрино. Поэтому стали различать два вида лептонных зарядов — мюонный и электронный: один — для мюона и его нейтрино и антинейтрино, другой — для электрона и его нейтрино и антинейтрино.

В 1975 году был открыт новый лептон, его назвали тау-лептоном (греческая буква τ). Предполагается, что и у него есть свое нейтрино и свой лептонный заряд.

Многочисленные эксперименты показали, что мюонный и электронный типы зарядов сохраняются в реакции каждый в отдельности. Остался до сих пор неясным только вопрос: с какой точностью выполняется закон сохранения лептонного заряда — абсолютно точно, как

в случае с электрическим зарядом, или приближенно? Ответ на этот вопрос ищут экспериментаторы, работающие на мезонных фабриках.

Мезонные фабрики и проверка закона сохранения лептонного заряда

Мезонная фабрика, как видно из названия, предназначена для «производства» мезонов. Основная установка мезонной фабрики — это сверхточный протонный ускоритель с энергией в несколько сотен мегаэлектронвольт. Мезоны и нейтрино рождаются при соударении ускоренных протонов с мишенью. Из-за большого среднего тока протонов мезонные пучки получаются в тысячи раз интенсивнее, чем то было на более ранних ускорителях. Большие потоки мезонов и нейтрино нужны для проведения опытов по изучению реакций, идущих с малой вероятностью, что особенно важно для реакций с нейтрино, и для получения очень большого числа наблюдаемых событий заданного типа и потому высокой точности в извлечении средней величины — вероятности реакции.

Погрешности в опытах на ускоренных частицах обусловлены не столько ошибками в измерениях, сколько именно статистическим характером вероятности реакции — основной физической величины теории. Именно для уменьшения погрешности в знании этой средней величины (статистической погрешности) повышают число измеряемых событий, которое пропорционально числу частиц в пучке нейтрино или мезонов, а в конечном счете ускоряемых протонов. Закон изменения величины статистической погрешности такой, что для уменьшения ее только в 10 раз надо увеличить число частиц в пучке в 100 раз. Это и достигается на мезонных фабриках.

Сейчас в мире четыре мезонные фабрики. Основу фабрик в Канаде и Швейцарии составляют кольцевые сверхточные ускорители, а мезонных фабрик в Лос-Аламосе (США) и в Троицке в Подмосковье — линейные ускорители (последний в стадии завершения строительства)*. Троицкий линейный ускоритель, разработанный в Московском радиотехническом институте АН СССР под руководством Б. П. Мурина, рассчитан на

* См. сб.: Программа экспериментальных исследований на мезонной фабрике ИЯИ АН СССР. Труды всесоюзного семинара. М., 1979.

ускорение протонов до энергии 600 мегаэлектронвольт и средний ток до одного миллиампера. Схема получения мезонного и нейтринного пучков следующая: π - и K -мезоны получают в результате бомбардировки мишени протонами; родившиеся мезоны фокусируются мощными магнитами и формируются в пучок, который затем направляется в мезонный зал для исследований; часть пучка ответвляется в канал (туннель), где мезоны распадаются и дают мюоны, нейтрино и антинейтрино; мюоны заворачиваются магнитами и фокусируются в мюонный пучок, направляемый в экспериментальный зал для мюонных исследований; канал же, в котором распадаются пионы, называется нейтринным — он заканчивается многометровой железной или земляной заглушкой, пропускающей дальше только нейтрино и антинейтрино, на их пути помещается экспериментальный зал нейтринных исследований.

Энергия мезонов и нейтрино на мезонных фабриках составляет несколько сотен миллионов электронвольт.

Какую основную цель преследуют в мюонных экспериментах? Как ни странно может показаться на первый взгляд, в этих исследованиях пытаются обнаружить случаи нарушения законов сохранения лептонного заряда! Иными словами, хотя бы получить ответ на вопрос: возможны ли реакции, запрещенные этим законом? Ясно, что ответ на этот вопрос будет тем точнее, чем больше проведется исследований и чем больше потоки мюонов. В Лос-Аламосе не было обнаружено ни одного случая запрещенного распада мюона на электрон и гаммаквант на 10^{10} случаев обычного, то есть разрешенного его распада на электрон, нейтрино и антинейтрино (причем одно из нейтрино должно быть мюонным, а другое — электронным). В этом распаде сохраняются по отдельности мюонный и электронный лептонные заряды. А если бы удалось найти хоть один случай запрещенного распада, то это означало бы несохранение порознь этих лептонных зарядов с вероятностью одной десяти-миллиардной. Со столь высокой точностью проверен этот закон!

Такой же результат получен и при поиске запрещенных распадов K -мезонов.

Поискам реакций с несохранением тау-лептонного заряда занимаются не только на мезонных фабриках. На встречных электрон-позитронных пучках в Стэнфор-

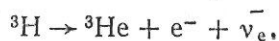
де в США получали тау-лептоны, а затем искали за- прещенные законом сохранения тау-лептонного заряда распады тау-частицы на мюон или электрон с образо- ванием гамма-кванта. В таких распадах, разрешенных всеми законами сохранения, кроме лептонного заряда, не сохранялись бы по отдельности разные типы лептон- ных зарядов. На 1000 случаев распада тау-частицы не найдено ни одного, нарушающего этот закон сохра- нения.

Интересно, что величина вероятностей распадов всех видов лептонов определяется одной постоянной слабого взаимодействия, а различия в величинах вероятностей связаны только с разными массами этих частиц. В этом смысле говорят о существовании $e-\mu-\tau$ универсальности. А как было сказано ранее, универсальности взаи- модействия отвечает закон сохранения соответствующе- го типа заряда (электрического, барионного или лептон- ного). Почему в таком случае существуют три типа леп- тонных зарядов? Эту задачу еще предстоит физикам решить.

У нейтрино есть масса!?

Интригующий вопрос — это вопрос о массе нейтри- но. Уже из первых опытов по измерению энергии элект- ронов бета-распада ядер обнаружили, что если у ней- трино и есть масса, то она по крайней мере в тысячи раз меньше массы самой легкой частицы с ненулевой массой покоя — электрона. Под массой нейтрино под- разумеается масса покоя (как уже говорилось, реляти- вистской массой обладают все частицы, поскольку ее величина определяется скоростью движения). 20 лет она считалась нулевой. Однако в последнее десятилетие по- явилось указание на возможное наличие у нейтрино массы.

В Институте теоретической и экспериментальной фи- зики (ИТЭФ) в Москве под руководством В. А. Люби- мова многие годы проводятся измерения спектра элект- ронов радиоактивного трития*. Цель работы — найти массу нейтрино по недостатке энергии в реакции



* См.: Третьяков Е. Ф., Любимов В. А. и др. Измерения β -спектра трития, предпринятые с целью уточнения верхнего пре- дела для массы покоя антинейтрино. Препринт ИТЭФ № 15, М., 1976.

Эта энергия должна уноситься нейтрино и превы- шать его массу покоя. Так как ядра трития и гелия по- коятся, то максимальная кинетическая энергия электро- на в распаде равна разности масс ядра трития и сум- марной массы ядра гелия, электрона и нейтрино (если она у него есть). Форма спектра также зависит от этой разности масс. Измеряя форму спектра и максимальную энергию вылета электрона, можно определить массу нейтрино.

Сложность опыта состоит в том, что ожидаемая мас- са нейтрино не должна превышать 100 электронвольт (вывод из более ранних опытов), то есть быть во много раз меньше упомянутой разности масс покоя начального трития и конечных продуктов распада, а эта разность равна 18 тысячам электронвольт. Поэтому все измере- ния надо делать с погрешностью не более сотых долей процента. Это особенно трудно еще и потому, что как раз в интересующей части спектра электронов вероят- ность распада трития очень мала и мало соответственно число вылетающих электронов. Опыт проводится более 10 лет. В 1980 году коллектив опубликовал результаты измерений и расчетов. Впервые получено эксперимен- тальное указание на то, что масса покоя нейтрино от- лична от нуля и находится в пределах от 14 до 46 элек- тронвольт.

В опытах ИТЭФ используется связанный тритий в составе молекулярного органического соединения вали- на ($\text{C}_5\text{H}_{11}\text{NO}_2$), в молекуле которого в среднем два из 11 атомов водорода заменены тритием. Спектр электро- нов от распада трития искажается из-за перехода ядра трития в ядро гелия-3 и перестройки электронной струк- туры молекулы. Величина искажения мала, но здесь существенна. Ее определяют приближенно. Поэтому и измеренное значение массы нейтрино устанавливается не точно, а указывается интервал, в котором она находится.

Эксперимент пока не удалось воспроизвести в других лабораториях мира, поскольку его постановка требует совершенной техники и большого опыта работы по из- мерениям спектра электронов при бета-распаде. Так, в опыте ИТЭФ для измерения малого потока электронов используется бета-спектрометр, в котором мешающий фон на порядок ниже, чем в лучших предыдущих изме- рениях. Подтверждение результатов эксперимента

ИТЭФ в других лабораториях будет иметь первостепенное значение — об этом расскажем в последней части книги, посвященной связи микро- и макромира.

Часть II.

Невидимки оставляют следы

ГЛАВА 4. ФОТОГРАФИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Вы вновь со мной, туманные виденья...

И. В. Гёте

Вихрей бунт встревожил воды,
От поверхности до дна
Вся пучина их полна.

В. А. Жуковский

Частицы ловит фотоэмульсия

Один из эффективных способов обнаружить след частицы — это выставить на ее пути фотопластинку, покрытую толстым — до миллиметра толщиной — слоем фотоэмульсии. Содержащая бромистое серебро эмульсия тормозит частицы, при этом они выделяют энергию, идущую на ионизацию вещества эмульсии и на химическое расщепление молекул бромистого серебра. Если такую пластинку проявить, то на ней будет виден след частицы. Метод прямого фотографирования частиц имеет то достоинство, что эмульсией можно покрывать значительную площадь, хоть величиной со стадион, и улавливать приходящие из космоса редкие частицы. Кроме того, фотографирование частиц при этом методе происходит в течение всего времени экспонирования.

Метод прямого фотографирования ядерных частиц позволил Ф. Пауэллу в 1947 году открыть в космических лучах пи-мезон.

Метод ядерных фотоэмульсий широко применяется в исследованиях космических лучей и в наши дни.

Туманная камера Вильсона

Триумфом экспериментальной физики первой половины нашего столетия было изобретение (в 1911 году) английским физиком Ч. Вильсоном туманной камеры, в которой вдоль следа частицы образуются капельки тумана.

Интересна история создания этого замечательного инструмента.

В 1894 году Вильсон пытался воспроизвести в лабораторных условиях радугу. Он проводил эксперименты по созданию тумана путем расширения камеры с пересыщенным паром. Капли тумана образовывались при внезапном расширении камеры и конденсации пересыщенного паром воздуха в основном на частичках пыли. Когда в 1895 году были открыты рентгеновские лучи, Вильсон использовал их для ионизации влажного воздуха камеры. С этой целью он применял и альфа-лучи от распада радиоактивного полония. Оказалось, что гамма-кванты и альфа-частицы с успехом заменяют частички пыли: движущиеся заряженные частицы и гамма-кванты производят ионизацию воздуха вдоль своей траектории движения, образующиеся ионы становятся центрами конденсации пара, и следы частиц видны в виде капелек.

Первые фотографии следов альфа-частиц и электронов Вильсону удалось получить в 1911 году, в 1912 году фотографии были опубликованы в журнале Королевского физического общества.

Наблюдение следов частиц в камере Вильсона производит исключительное впечатление. Можно видеть, как пространство камеры периодически пронизывают лучи, «проявленные» капельками тумана. Такую картину вызывают, в частности, радиоактивные препараты, помещенные в камеру. При альфа-распаде в камере образуется «звездочка» лучей. Этот фейерверк получается в результате столкновения альфа-частиц с атомами воздуха, находящегося в камере.

Однако обычно следы частиц не наблюдают, а фотографируют.

Туманная камера часто использовалась для поиска новых частиц в космических лучах, исследования излучения не известных по составу радиоактивных препаратов.

Для выяснения того, какие частицы участвуют в реакции, измеряют толщину следа, которая свидетельствует о степени ионизации воздуха частицей, то есть о ее заряде.

Принципиально новую возможность в определении частиц в туманной камере открыл советский физик Д. В. Скобельцын в 1927 году, поместив камеру в постоянное

магнитное поле и сфотографировав след пролетевшей сквозь нее космической частицы. По кривизне следа (трека) в магнитном поле определяется скорость частицы.

Камера Вильсона сыграла важнейшую роль в развитии физики элементарных частиц. Ее для исследования космических лучей устанавливали на вершинах гор и опускали в шахты, поднимали на баллонах на высоту в десятки километров. Резерфорд отзывался о ней как о «наиболее оригинальном и замечательном инструменте». В 1927 году за создание камеры Вильсону была присуждена Нобелевская премия.

В 1932 году при исследовании спектров электронов космических лучей К. Андерсон получил первую фотографию прошедшего через туманную камеру позитрона. В 1937 году он вместе с Ниддермейером в таком же опыте впервые сфотографировал мюон.

Туманная камера сыграла важную роль и в открытии нейтрона. В 1932 году И. Кюри и Ф. Жолио опубликовали фотографию со следом протона (к тому времени эта частица была открыта). Из нее было ясно, что протон выбит из ядра неизвестным излучением, исходящим из бериллия, облученного альфа-частицами радиоактивного препарата. Позднее Д. Чедвик установил, что частица нового излучения — это и есть нейтрон.

В 1939 году немецкие физики О. Ган и Ф. Штрассман изучали в камере Вильсона деление урана и получили фотографии этого процесса.

В 1947 году английские физики Д. Рочестер и К. Батлер с помощью камеры Вильсона открыли в космических лучах V-образные следы. Эти следы объяснили распадом неизвестной ранее нейтральной, а потому невидимой тяжелой частицы. Ее назвали лямбда-гипероном (Λ). Он нестабилен и распадается за время в миллиардные доли секунды на протон и пион, которые, разлетаясь из точки распада, и образуют вилкообразный след.

Частицы кипятят жидкость

С созданием в начале 50-х годов ускорителей протонов с энергией в миллиарды электронвольт потребовалось иметь новый прибор, который отличался бы от туманной камеры большим количеством вещества и большей его плотностью. В таком приборе частицы будут

сильнее тормозиться и, следовательно, оставят след гораздо большей кривизны. А это, в свою очередь, позволит точнее измерить скорость частиц, определить длину следа и его толщину. Ведь частицы высокой энергии пролетают сквозь туманную камеру, не останавливаясь в ней и почти не искривляя своей траектории. В этом случае частицы просто нельзя опознать. Фотоэмульсионный метод также уже не удовлетворял физиков, поскольку эмульсии представляют собой настоящий винегрет из ядер водорода, углерода, азота, кислорода, брома, серебра — поди установи, на каком ядре произошла реакция! Задача была просто неразрешимой. В новом приборе рабочее вещество должно было бы иметь один тип ядер.

Такой физический прибор — пузырьковую камеру — изобрел в 1952 году научный сотрудник Мичиганского университета Д. Глейзер.

Камера с прозрачными стенками заполняется перегретой жидкостью. Когда через нее пролетает частица, жидкость мгновенно вскипает вдоль всего пути движения частицы. Образуются пузырьки, которые в тысячные доли секунды фотографируются. Чтобы вся жидкость не вскипела, ее тут же сжимают поршнем, повышая давление. При повышении давления жидкость уже перестает быть перегретой, она перестает кипеть и пузырьки исчезают. (Общезвестно, что на вершине высокой горы, где воздух разреженный, вода закипает быстрее, чем у ее подножия; если такую кипящую жидкость внезапно опустить на уровень моря, то кипение прекратится именно из-за повышения давления. Верно и обратное: чуть-чуть недоведенная до кипения на уровне моря жидкость после внезапного поднятия ее на высоту в несколько километров обязательно закипит.)

После исчезновения пузырьков камера снова готова к работе.

Первая пузырьковая камера Глейзера представляла собой небольшую ампулу из стекла, заполненную жидким диэтиловым эфиром. Глейзер не только изобрел такую камеру. Он же разработал теорию образования и роста пузырьков в перегретой жидкости.

Первую фотографию пролетевшей через камеру космической частицы (мюона) Глейзер получил в 1952 году и опубликовал на следующий год в американском журнале «Физическое обозрение».

За изобретение пузырьковой камеры и пионерские исследования частиц с ее использованием Глейзеру в 1960 году была присуждена Нобелевская премия.

В 1953 году были сконструированы камеры с жидким водородом при низких температурах в качестве рабочего вещества. Такие камеры широко применяются в настоящее время. Многие открытия 60-х и 70-х годов выполнены на пузырьковых камерах. Это в первую очередь обнаружение новых короткоживущих частиц. Время их жизни — от 10^{-21} до 10^{-23} секунды.

Первая в нашей стране пузырьковая камера, а затем и первая камера большого объема с использованием тяжелой рабочей жидкости (пропана) была построена в ИТЭФе. Как и в жидком водороде, в пропане вдоль пути движения частиц образуются пузырьки, позволяющие видеть и фотографировать след частицы. Позднее в мировой практике стали широко применять в пузырьковых камерах тяжелые жидкости, способные сильно тормозить частицы. Это пропан, фреон, ксенон и различные смеси, с которыми можно работать при комнатных температурах. В 1957 году в ИТЭФе была введена в эксплуатацию самая большая в то время (объемом 17 литров) пузырьковая камера с тяжелыми жидкостями. Сейчас же ксеноновая камера ДИАНА имеет объем 700 литров. Ее название расшифровывается так: Детектор и Анализатор Нейтральных Адронов.

В 60-х годах на этих камерах проводился поиск редких распадов рождающихся в протонных соударениях мезонов. Протоны ускорялись на протонном синхротроне на энергию 7 гигаэлектронвольт. На этом ускорителе в опытах с 17-литровой пропан-ксеноновой камерой был открыт электромагнитный тип распада сильно взаимодействующего короткоживущего омега-мезона (ω -мезона) — возбужденного состояния системы трех пионов. Омега-мезоны наблюдались в столкновениях, получаемых на ускорителе вторичных пионов с протонами мишени — веществом пузырьковой камеры. Получив 100 тысяч снимков, фиксирующих превращения элементарных частиц, и просмотрев их, исследователи обнаружили события с рождением омега-мезона и последующим его распадом не только на три пиона, но и на нейтральный пион и гамма-квант. Опыт доказал, что омега-мезон участвует как в сильных взаимодействиях, так и в электромагнитных, связывая их. Эта работа была при-

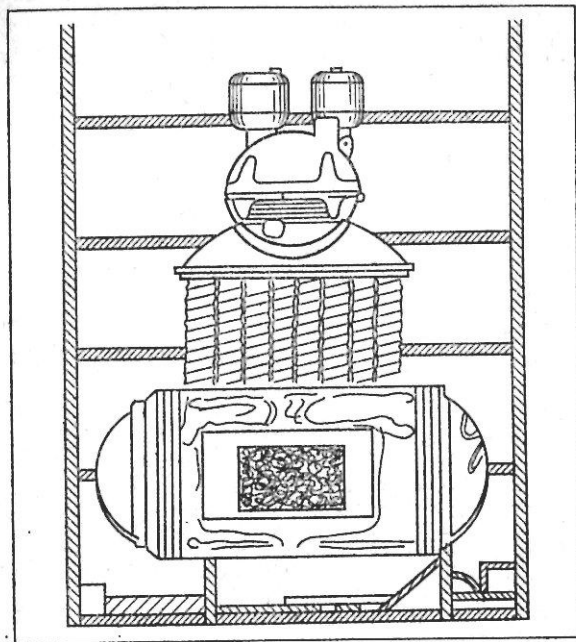


Рис. 7. Общий вид пузырьковой камеры.

знана открытием и в качестве такового занесена в Государственный реестр открытий СССР. Авторы открытия — В. В. Бармин, А. Г. Долголенко, Ю. С. Крестников, А. Г. Мешковский, Ю. П. Никитин, В. А. Шебанов.

Существующие сейчас пузырьковые камеры представляют собой грандиозные сооружения высотой в многоэтажный дом. Наиболее крупные из них установлены в начале 70-х годов (рис. 7). Самая крупная в СССР камера СКАТ работает в Серпухове с 1974 года на нейтринном пучке ускорителя протонов на 70 гигаэлектронвольт. Ее размеры $4,5 \times 1,6 \times 1,5$ метра. Жидкий фреон находится в ней под давлением 30 атмосфер при температуре несколько градусов Цельсия. Фотографирование следов частиц осуществляется 4 фотокамерами с широкоугольными объективами. Камера находится в магнитном поле мощного электромагнита с напряженностью поля в 27 килогаусс* и потребляет мощность 10 мега-

* Гаусс — единица магнитной индукции. $1 \text{ Гс} = 10^{-4}$ тесла,

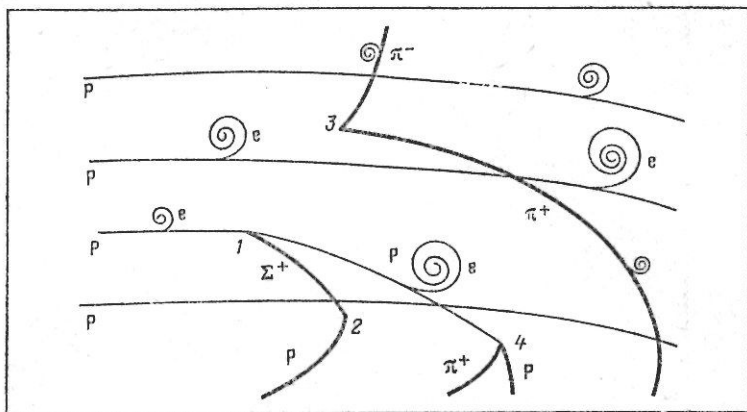


Рис. 8. Типичный снимок событий, происходящих в пузырьковой камере: начальная частица — протон; показано распределение следов для реакции с рождением в точке 1 нейтрального каона и Σ^+ -гиперона ($p+p \rightarrow p+\Sigma^++K^0$); Σ^+ -гиперон распадается в точке 2 на протон и нейтральный пион, а невидимый на снимке нейтральный каон — на два пиона в точке 3; в точке 4 происходит реакция $p+p \rightarrow p+\pi^++p$ при соударении вторичного протона с протоном рабочего вещества камеры, при этом рождаются π^+ -мезон и протон (его тоже не видно на снимке). Помимо треков частиц, участвующих в реакциях, на снимке видны также следы электронов малых энергий, вырывааемых из атомов при их ионизации пролетающими частицами, траектории этих электронов — сходящиеся спирали; вдоль траекторий на снимке — обозначения частиц, но при обработке снимков с пузырьковой камеры определить, какая частица оставила тот или иной след, — задача немаловажно трудная.

ватт. Большие размеры и выбор в качестве рабочего вещества тяжелой жидкости обусловлены необходимостью максимального увеличения количества вещества для большей вероятности захвата им нейтрино. На рис. 8 приведен пример снимка с пузырьковой камеры. Анализируя распределения частиц на снимках, ученые исследуют слабое взаимодействие частиц.

В экспериментах на нейтринном пучке в ЦЕРНе в Женеве, получаемом на ускорителе протонов с энергией 28 гигаэлектронвольт, используется пузырьковая камера «Гаргамель» (с жидким фреоном) таких же размеров, что и камера СКАТ. Название камере дали по имени матушки Гаргантюа, героя произведения французского писателя Ф. Рабле «Гаргантюа и Пантагрюэль», которая, как мы знаем, весьма дородная дама.

На снимках, полученных в этой камере, ученые впервые обнаружили случай рассеяния нейтрино на протоне без образования новых частиц — так называемое упругое рассеяние, а несколько позднее и упругое рассеяние нейтрино на электроне. Это новый тип процессов, управляемых слабым взаимодействием. Он получил название взаимодействия с нейтральными токами, так как в нем отсутствует передача заряда от одной частицы к другой.

С 1973 года в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (ФНАЛ) в США работает почти сферическая 15-футовая* жидководородная пузырьковая камера объемом 33 кубических метра. Одна из важнейших решенных на этой камере задач — измерение вероятности нейтринного взаимодействия с протонами как функции энергии нейтрино. Оказалось, что в соответствии с теорией слабого взаимодействия вероятность линейно растет с увеличением энергии нейтрино вплоть до нескольких сотен гигаэлектронвольт. Камера применялась в эксперименте на нейтринном пучке крупнейшего в мире кольцевого ускорителя протонов с энергией 500 гигаэлектронвольт. Путем замены обычных электромагнитов на сверхпроводящие энергии ускоренных протонов сейчас доводится до 1000 гигаэлектронвольт.

В 7-футовой жидководородной пузырьковой камере в Брукхэйвенской национальной лаборатории (США) на нейтринном пучке в 1975 году был открыт новый тип гиперона — гиперон с квантовым числом, получившим название «очарование» (об этом квантовом числе еще будем говорить). В 1976 году второе событие с рождением очарованного гиперона наблюдалось на нейтринном пучке в камере «Гаргамель».

Одно из основных направлений в использовании пузырьковых камер в настоящее время — это установка их в комплексе с другими измерительными устройствами, например с искровыми камерами, регистрирующими электрический заряд вдоль следа частицы. Это стало необходимым из-за перехода к исследованиям с энергиями ускоренных частиц в сотни гигаэлектронвольт и выше. При таких больших энергиях вторичные частицы, образующиеся в соударениях первичной ускоренной частицы с веществом в пузырьковой камере, вылетают за пределы камеры. Их улавливают еще более крупными

* Фут — английская единица длины, равная 0,3048 метра.

детекторами, содержащими уже сотни тонн металла. Такие детекторы располагают вблизи пузырьковой камеры, и они работают синхронно с ней и импульсом ускорителя.

Частица высекает искру

Для выявления (регистрации) следов частиц применяются также искровые и стримерные камеры.

Искровые камеры представляют собой параллельный набор металлических пластин, помещенных в газ. Назначение пластин — быть электродами. Пролетающая через прибор частица ионизирует газ, и вдоль ее следа возникает электрический пробой. Этот след-искра фотографируется. Вес искровых камер — несколько тонн. Такая масса вещества позволяет регистрировать слабо взаимодействующие с веществом частицы.

Искровые камеры применяют в опытах с нейтрино (с их помощью, в частности, было обнаружено мюонное нейтрино). Обычно используют электроды в виде сетки тонких проволочек, натянутых на расстоянии около миллиметра одна от другой. При подаче высокого напряжения на сетку пробой происходит во время прохождения частицы между проволочками, что позволяет определить координаты трека частицы. Сигналы от проволочных искровых камер поступают на ЭВМ.

Использование искровых камер позволило избежать необходимости фотографирования следов с последующей сложной обработкой снимков.

В разработанных в 60-х годах стримерных камерах используются очень короткие импульсы напряжения длительностью всего в сотые доли микросекунды. Когда частица пролетает через камеру, вдоль ее следа вспыхивают короткие искры — стримеры.

Преимущество искровых камер по сравнению с пузырьковыми состоит в том, что они включаются в работу самой проходящей частицей, а также в их большом быстродействии, поскольку ионизационные следы частиц в газе быстро исчезают после снятия напряжения. Однако искровые камеры — это только детекторы, а пузырьковые камеры служат одновременно и мишенями для ускоренных частиц.

За разработку первой стримерной камеры сотрудничали Объединенного института ядерных исследований, Московского инженерно-физического института и Ин-

ститута физики АН Грузинской ССР Б. А. Долгошеину, Б. И. Лучкову, В. Н. Роинишвили, Г. Е. Чиковани присуждена Ленинская премия.

С использованием стримерной камеры на протонном ускорителе в ЦЕРНе были открыты первые короткоживущие мезоны. Один из авторов открытия — советский физик Г. Е. Чиковани.

Частицы вызывают вспышки

Все предыдущие измерительные приборы физики частиц относятся к типу трековых детекторов, в которых виден след частицы. Другой вид детекторов — счетчики, в которых проходящая частица обнаруживает себя вспышкой света. Первый такой прибор — это спинтари-скоп, изобретенный У. Круксом в 1904 году. В нем наблюдают сцинтилляции (вспышки света), если на флюоресцирующий экран попадает альфа-частица. Этот прибор использовал Резерфорд в опытах, доказавших существование у атома ядра.

Однако подсчет световых вспышек очень утомителен. Для наблюдения сцинтилляций необходимо долгое время находиться в темноте, чтобы глаза привыкли к слабому свету. Результат подсчета зависел от индивидуальных способностей наблюдателя.

Современное широкое использование сцинтилляционных счетчиков связано с созданием в конце 40-х годов фотоэлектронных умножителей, усиливающих вспышку света в миллионы раз и позволяющих автоматизировать процесс подсчета сцинтилляций.

Применение жидких сцинтилляторов позволило открыть антинейтрино в потоке частиц атомного реактора.

Другой тип счетчика, в котором прохождение частицы вызывает световую вспышку, — это черенковский счетчик.

В 1934 году П. А. Черенковым, аспирантом известного советского физика С. И. Вавилова, в Физическом институте АН СССР им. П. Н. Лебедева (ФИАН) при изучении люминесценции солей урана под действием гамма-излучения был открыт новый тип свечения жидкостей. Возникло предположение, что оно и вызывается быстрыми электронами, возникающими в среде при прохождении гамма-лучей. Опыты это подтвердили.

Решающим фактом в пользу установления физической природы нового излучения и отличия его от извест-

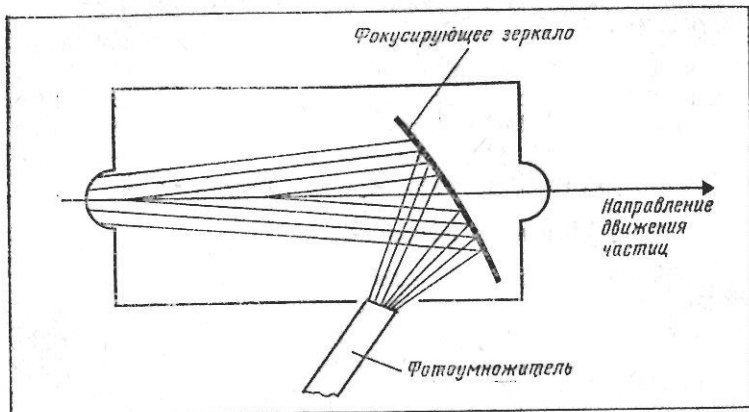


Рис. 9. Схема работы заполненного газом черенковского счетчика: пролетая через счетчик, частица возбуждает атомы газа, испускаемое атомами электромагнитное излучение отражается и фокусируется зеркалом на фотоэлемент, а последний вырабатывает электрический импульс.

ного явления флюоресценции послужило открытие П. А. Черенковым в 1936 году наиболее замечательного свойства этого излучения — направленности. Черенковское свечение обладает резко выраженной пространственной асимметрией. Оно испускается только вперед под некоторым углом к направлению движения возбуждающей среду заряженной частицы или пучка фотонов.

В 1937 году теоретики из Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) И. Е. Тамм и И. М. Франк опубликовали разработанную ими теорию эффекта Черенкова. Согласно ей излучение Черенкова — это электромагнитное излучение атомов среды, возбуждаемых проходящей частицей, если ее скорость превышает скорость света в данном веществе. Излучение распространяется под углом к направлению движения заряженной частицы, косинус которого — отношение скорости света в веществе к скорости частицы.

Столь простое соотношение возникает как результат отношения путей, проходимых за одно и то же время излучением и частицей, его возбудившей. Такая же связь существует, кстати, и в макропроцессах, к которым относится, например, движение фронта ударной волны, распространяющейся в воздухе, когда самолет летит со сверхзвуковой скоростью. С той лишь разни-

цей, что здесь «действующее лицо» не свет, а звук. Наконец, то же самое наблюдается и на поверхности воды при движении корабля со скоростью, превышающей скорость распространения поверхностных волн.

Исследования советских ученых, открывших и изучивших новый тип излучения, высоко оценены советской и мировой научной общественностью. В 1947 году С. И. Вавилову, П. А. Черенкову, И. Е. Тамму и И. М. Франку была присуждена Государственная премия, а в 1958 году троим из них: П. А. Черенкову, И. Е. Тамму и И. М. Франку — Нобелевская премия.

Начало широкого применения черенковских счетчиков в физических экспериментах относится к 1947 году, когда для усиления черенковского излучения стали использовать изобретенные к тому времени фотоумножители (рис. 9).

Черенковские счетчики предназначены для регистрации сверхбыстрых частиц. Без этих счетчиков практически были бы невозможны открытия последних лет, когда стали экспериментировать с частицами, энергия которых достигает десятков и сотен гигаэлектронвольт. Так, благодаря черенковским счетчикам группе физиков из Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) в Дубне (А. М. Балдин, М. Н. Хачатурян, И. В. Чувило и другие) удалось открыть электромагнитный тип распада короткоживущего фи-мезона (ф-мезон) на электрон-позитронную пару. Поскольку фи-мезон — сильновзаимодействующая частица, а электрон и позитрон испытывают только электромагнитное взаимодействие, то обнаружение электромагнитного типа распада сильновзаимодействующей частицы говорит о связи сильного и электромагнитного взаимодействий, то есть о возможности перехода от одного к другому.

Значительным событием стала регистрация ядер антивещества в 1969 году в эксперименте на знаменитом Серпуховском ускорителе протонов. Сформированный на ускорителе пучок отрицательно заряженных частиц с энергией от 20 до 40 гигаэлектронвольт пропускаться через черенковские и сцинтилляционные счетчики. Когда проанализировали 200 миллиардов пролетевших через счетчик частиц, то оказалось, что 5 из них были ядрами отрицательно заряженного антигелия.

Через 5 лет в эксперименте на этом же ускорителе удалось получить и ядра антитрития.

ГЛАВА 5. НЕВИДИМКИ МОЖНО УСКОРЯТЬ

Ни голая рука, ни предоставленный самому себе разум не имеют большой силы. Дело совершается орудиями и вспоможениями, которые нужны разуму не меньше, чем руке.

Ф. Бэкон

Ускорители элементарных частиц

До середины XX столетия основным источником знаний о частицах были опыты с природными излучателями — радиоактивными веществами, космическими лучами. С начала 60-х годов физики перешли к экспериментам на ускорителях частиц, причем мощность ускорителей все время росла и продолжает расти. Физические лаборатории превращаются в дорогостоящие промышленные гиганты.

Первые ускорители протонов, основанные на электростатическом генераторе высокого напряжения в несколько миллионов электронвольт, были построены английским и ирландским физиками Д. Кокрофтом и Э. Уолтоном в 1932 году и американским физиком Р. Ван де Граафом в 1931 году. Максимально достигнутая на таком типе ускорителей энергия протонов — 15 миллионов электронвольт.

В 1931 году американский физик Э. Лоуренс построил другой тип ускорителя — циклотрон. В циклотроне протоны ускоряются в пустотелом, разрезанном на две половины вакуумированном диске, расположенном между полюсами постоянного магнита. В его поле частицы обращаются с определенным периодом по расширяющимся круговым орбитам (рис. 10). Когда частица пролетает между двумя электродами с небольшой разницей потенциала, ей сообщается небольшая дополнительная энергия. Частота переменного электрического поля между электродами равна частоте обращения частицы на орбите. Если за один цикл ускорения частица получит дополнительно энергию всего в 50 килоэлектронвольт, то за 200 циклов приращение энергии составит 10 мегаэлектронвольт. При такой энергии скорость протона — это уже седьмая часть скорости света, а скорость электрона равна скорости света. Чтобы рассчитать движение частиц в циклотроне при больших энергиях, необходимо пользоваться соотношениями специальной теории относительности. Успешное осуществление ускорения реля-

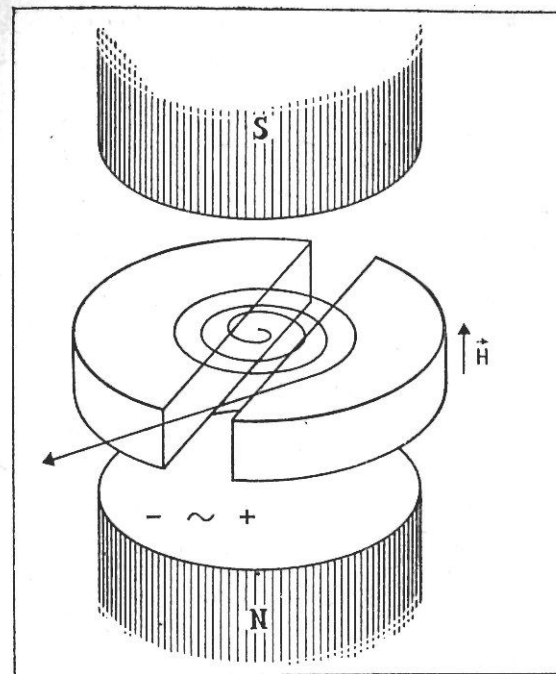


Рис. 10. Схема циклотрона: в вакуумной круговой камере, помещенной в магнитном поле, движутся по спирали протоны, ускоряемые переменным электрическим полем.

тивистских частиц, движущихся по строго заданным для них траекториям, стало важнейшим доказательством справедливости этой теории. Так практика стала критерием истинности теории!

Если энергия частиц достигает десятков мегаэлектронвольт, а скорость их становится почти световой и масса возрастает в соответствии с законами теории относительности, частицы начинают замедлять свой бег. По этой причине период обращения частиц перестает быть постоянным, между движением частиц и импульсами напряжения, предназначенными для их ускорения, исчезает синхронность. Стало ясно, что возможности циклотронов с постоянным магнитным полем для ускорения частиц ограничены.

Поиски нового решения привели к идее о том, чтобы менять частоту ускоряющих импульсов в соответствии

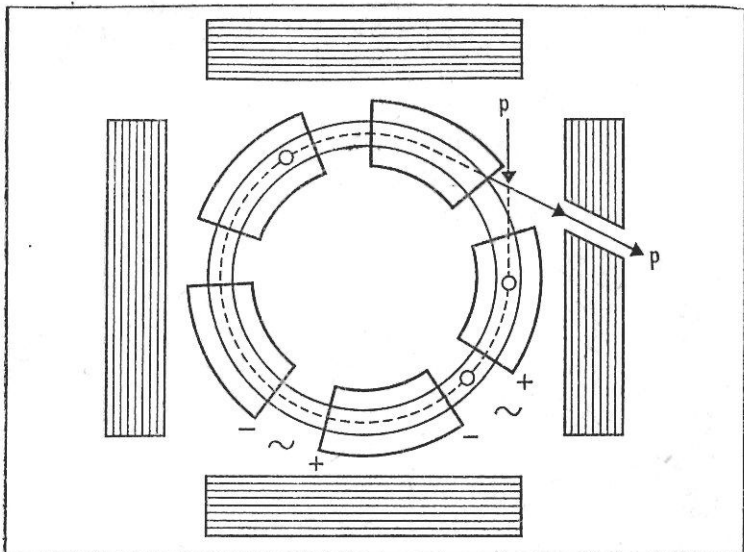


Рис. 11. Схема протонного синхротрона: вакуумная трубка диаметром несколько сантиметров находится внутри электромагнитов, создающих переменное магнитное поле; в промежутках между магнитами протоны ускоряются переменным электрическим полем; протоны вводятся в синхротрон после предварительного ускорения в линейном ускорителе. Вся установка окружена бетонной защитой.

с изменением частоты обращения частиц по орбитам и таким образом синхронизовать фазу электрического поля и движение частиц. Этот принцип реализован в фазотроне. На нем достигается энергия до 1 гигаэлектронвольта.

Переход к еще большим энергиям требует использования очень мощных и дорогих магнитов. Поэтому с повышением энергии частиц стали увеличивать синхронно и магнитное поле, удерживающее частицы на круговой орбите. Это позволило организовать движение частиц не в сплошном большом объеме между полюсами магнита, а в вакуумной трубе в форме тороида, обрамленной кольцевым магнитом (рис. 11).

Если ускоряются электроны, то они быстро достигают скорости света и частота их обращения становится постоянной. В электронном ускорителе частоту ускоряющего электрического поля также оставляют пос-

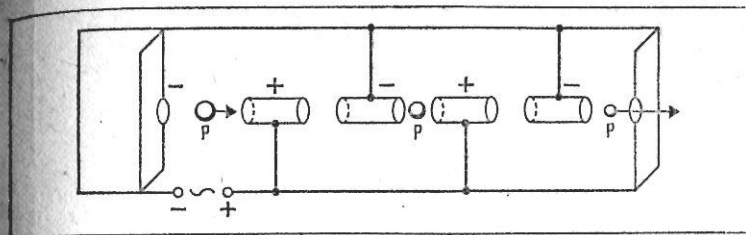


Рис. 12. Принципиальная схема линейного ускорителя: расположенные посередине так называемые дрейфовые трубки находятся под переменным электрическим потенциалом, частота подобрана так, чтобы за время прохождения протона внутри дрейфовой трубки знак приложенного к ней потенциала менялся, чем и достигается ускорение частиц.

тоянной, синхронизовано с движением электронов только магнитное поле. Такие циклические ускорители получили название синхротронов. Их энергия составляет несколько гигаэлектронвольт.

Однако для ускорения протонов или более тяжелых частиц, скорость которых приближается к скорости света только при энергиях в десятки и даже в сотни гигаэлектронвольт, менять приходится синхронно и ускоряющее электрическое поле, и удерживающее на орбите мощное магнитное поле. Такие кольцевые ускорители называются синхрофазотронами. Это современный тип протонного ускорителя. Его еще часто называют протонным синхротроном.

Первичные электроны получают с нагретого катода, ускоряют до сотен килоэлектронвольт и с помощью устройства, именуемого очень метко электронной пушкой, «впрыскивают» в тороидальную вакуумную камеру кольцевого ускорителя. Если осуществляется ускорение протонов, то их сперва получают ионизацией водорода в газоразрядной трубке, затем вытягивают из нее постоянным электрическим полем, ускоряют статическим напряжением до энергии порядка 100 килоэлектронвольт и затем вводят в вакуумпровод основного кольцевого ускорителя.

Существует также тип линейного ускорителя. Здесь первичные электроны или протоны, частично ускоренные, также вводятся в вакуумную камеру, имеющую уже вид прямой трубы иногда длиной до нескольких

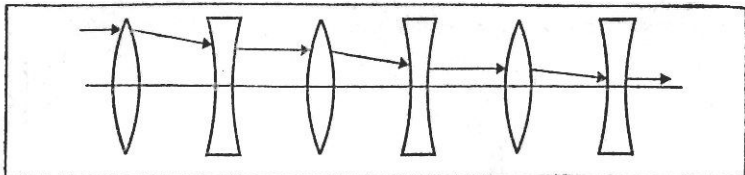


Рис. 13. Схема жесткой фокусировки частиц: используются магниты определенной конфигурации, действующие подобно собирающим и рассеивающим линзам.

километров. Ускорение осуществляется распространяющимся в трубе, как в волноводе, мощным высокочастотным электромагнитным полем. Достижимые энергии здесь обычно не превышают нескольких гигаэлектронвольт. Зато потоки частиц на несколько порядков выше, чем в кольцевых ускорителях. Линейные ускорители нужны для исследования реакций, идущих с малыми вероятностями: ведь чем меньше вероятность реакции, тем большим числом ускоренных частиц надо обстреливать мишень (рис. 12).

Для возбуждения ядерной реакции ускоренные частицы либо направляются на расположенную внутри вакуумпровода внутреннюю мишень, либо выводятся из ускорителя мощным импульсным магнитом на внешнюю мишень, находящуюся в экспериментальном зале. В последнем случае приходится делать канал транспортировки частиц до мишени. Это сами по себе сложные технические устройства.

С конца 50-х годов в ИТЭФе начали расчет первого в нашей стране ускорителя протонов, в основу которого был положен новый принцип жесткой фокусировки. В ускорителях предыдущего поколения, например на дубненском синхрофазотроне, разгоняемые частицы сжимаются в вакуумпроводе в пучок одинаковым по периметру кольца магнитным полем, относительно слабо меняющимся по радиусу сечения вакуумной камеры. В протонном синхротроне с жесткой фокусировкой намечалось установить магниты определенной конфигурации, по своему действию на пучок частиц эквивалентные рассеивающим и собирающим линзам в оптике. При специальном подборе таких линз можно получить фокусирующий эффект благодаря тому что луч проходит через рассеивающую линзу ближе к главной оси

оптической системы, чем через собирающую линзу. Это видно из схемы, изображенной на рис. 13. Расчеты показывали, что таким образом удастся получить хорошую фокусировку пучка при значительно уменьшенном диаметре сечения вакуумной камеры, доведя его до нескольких сантиметров. Легче и меньше станут и магниты.

Принцип жесткой фокусировки давал возможность проектировать ускорители протонов на энергии в десятки гигаэлектронвольт и выше, но одновременно он и предъявлял очень высокие требования к точнейшей подгонке (юстировке) всей системы магнитов по отношению к кольцу вакуумной камеры.

В 1961 году в ИТЭФе был построен на принципе жесткой фокусировки протонный синхротрон, способный ускорять частицы до 7 гигаэлектронвольт. Ускоритель стал прототипом разработанного здесь же крупнейшего в мире (до 1972 года) протонного синхротрона на энергию 76 гигаэлектронвольт, построенного затем в Серпухове.

В 1973 году протонный синхротрон ИТЭФ был реконструирован. Теперь уже энергия ускоренных протонов достигла 10,5 гигаэлектронвольта, интенсивность пучка — до $2 \cdot 10^{11}$ протонов за цикл ускорения, продолжающийся 4 секунды. В паузе между основными циклами идет ускорение протонов с энергией 200 мегаэлектронвольт, используемых для медико-биологических исследований.

К ускорительному кольцу примыкают внешний и внутренний экспериментальные залы, зал водородных и тяжеложидкостных пузырьковых камер.

На ускорителе выполнен большой цикл работ по измерению рассеяния π -мезонов на нуклонах под большими углами. Такие исследования позволили судить о структуре протона и нейтрона, здесь открыт электромагнитный тип распада омега-мезона.

Сейчас на ускорителе проводятся опыты по рассеянию как частиц, так и легких ядер на ядрах мишени.

Крупнейший советский ускоритель

Крупнейший советский протонный ускоритель на 76 гигаэлектронвольт в Институте физики высоких энергий в Серпухове работает с конца 1967 года. Первоначально протоны образуются в результате газового разряда, за-

тем ускоряются электрическим полем высоковольтного импульсного трансформатора до энергии 760 килоэлектронвольт, после чего попадают в линейный ускоритель — инжектор для ускорения уже до 100 мегаэлектронвольт и только отсюда поступают в кольцо основного ускорителя. Диаметр этого ускорителя равен 472 метрам. В нем за один цикл ускоряется до 5 триллионов протонов. Импульсы повторяются каждые 7 секунд. Ускоритель потребляет мощность 100 мегаватт, достаточную для питания электроэнергией небольшого города.

Вдоль кольца ускорителя расположен экспериментальный зал площадью 90×150 квадратных метров. К нему примыкает галерея длиной 360 и шириной 30 метров. Она тянется до павильона, в котором расположена жидководородная пузырьковая камера «Людмила», созданная в 1971 году сотрудниками ОИЯИ. Далее галерея продолжается до помещения с камерой СКАТ (нейтринный канал).

За разработку и ввод в действие всего ускорительного и инженерного комплекса протонного синхротрона Института физики высоких энергий В. В. Владимирскому, Д. Г. Кошкареву, А. А. Кузьмину, А. А. Логунову, Р. М. Суляеву, И. Ф. Мальцеву присуждена Ленинская премия 1970 года, а большой группе ученых и инженеров — Государственные премии того же года.

Эксперименты на ускорителе осуществляются как на внутренней мишени, расположенной в самой вакуумной камере ускорителя, так и на выведенных пучках частиц с использованием внешней мишени. На этих пучках проводится основная часть опытов. Важнейшая группа выполненных на них экспериментов — это измерение вероятностей рассеяния протонов, антипротонов, π - и K -мезонов на протонах.

Результаты оказались совершенно неожиданными. Ранее было известно, что при меньших энергиях — до 30 гигаэлектронвольт — вероятности рассеяния частиц убывают с ростом энергии. Логика подсказывала, что так должно быть и при дальнейшем росте энергии. Однако опыты ИФВЭ показали, что вероятности рассеяния протонов, антипротонов и π -мезонов перестают уменьшаться, а K -мезонов даже начинают расти с переходом к энергии 70 гигаэлектронвольт. Это явление получило название серпуховского эффекта. Оно зарегистрировано в качестве открытия.

Серпуховский эффект привлек внимание физиков всего мира. Он был подтвержден последующими опытами на ускорителях с большими энергиями — 500 гигаэлектронвольт в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми и 400 гигаэлектронвольт — в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) в Женеве. Теоретикам пришлось пересмотреть в связи с этим эффектом отдельные положения динамики взаимодействия частиц высоких энергий. Исходя из физического смысла вероятностей рассеяния, можно сказать, что поперечное сечение протона возрастает с увеличением энергии. До каких пор будет продолжаться этот рост? Существует ли предел роста? Такие новые вопросы возникли перед физикой.

Одним из направлений в изучении природы сильного взаимодействия является наблюдение и анализ процессов множественного рождения частиц при высоких энергиях. Экспериментальное и теоретическое исследование таких реакций столкнулось с принципиальной трудностью, заключающейся в сильном усложнении как расчетов, так и измерений в связи с ростом числа вторичных частиц. Теоретики А. А. Логунов и М. А. Мествиришвили предложили новый подход к исследованию таких процессов, в основе которого лежит как теоретическое, так и экспериментальное изучение поведения только одной родившейся частицы. Именно такое экспериментальное исследование в группе Ю. Д. Прокошкина привело к открытию в 1969 году явления так называемой масштабной инвариантности. Его суть состоит в том, что спектры вылетающих вторичных частиц не зависят от начальной энергии в реакции, а только от отношения энергии детектируемой частицы к начальной энергии. Новая закономерность зарегистрирована в качестве открытия СССР. Ее справедливость подтверждена в опытах с большими энергиями на ускорителях в ФНАЛе и ЦЕРНе.

Обнаруженное свойство энергетических спектров используется как основа при решении практических задач: проектирования ускорителей, получения новых пучков вторичных частиц, расчетах биологической защиты для создания условий безопасной работы на ускорителях сверхвысоких энергий.

Будущее советской физики элементарных частиц связано с грандиозным проектом ускорительно-накопительного комплекса протонов, который предполагается по-

строить там же — в Серпухове, на территории ИФВЭ*. Главной машиной будет 20-километровый (в окружности) кольцевой протонный синхротрон, ускоряющий частицы до энергии в 3 тысячи гигаэлектронвольт.

Большие размеры ускорителя обусловлены необходимостью удержания на круговой орбите протонов сверхвысокой энергии магнитным полем, которое не удастся сделать больше нескольких тысяч гаусс. Всю установку предполагается построить двухступенчатой. Протоны первоначально будут ускоряться до 70 гигаэлектронвольт в существующем ускорителе, а затем переходить в вакуумную камеру первой ступени сверхускорителя. Здесь протоны разгонятся до энергии в 600 гигаэлектронвольт, а затем поступят во вторую ступень ускорителя (второе кольцо), где уже в поле сверхпроводящих магнитов энергия протонов будет доведена до конечного значения.

Встречные пучки ускоренных частиц

Традиционная постановка экспериментов в физике частиц до 70-х годов состояла в том, что частицы ускорялись и направлялись затем на неподвижную мишень. Недостаток этого приема в том, что лишь небольшая часть энергии налетающей частицы идет на образование других тяжелых частиц. Большая же доля энергии переходит в кинетическую энергию продуктов реакции. Это обусловлено действием закона сохранения импульса.

Действительно, суммарный импульс конечных частиц равен импульсу налетающей частицы. Поэтому и кинетическая энергия конечных частиц велика. Если ее вычесть из энергии начальной частицы, то как раз получим максимальную массу покоя частиц, которые могут образоваться в реакции. Согласно теории относительности эта масса равна среднему геометрическому от энергии налетающей частицы и удвоенной массы покоя частицы мишени. Например, если ускоренный до 400 миллиардов электронвольт протон падает на водородную мишень, то максимальная масса покоя частицы, которая могла бы родиться в таком соударении, равна среднему

* См.: Ускорительно-накопительный комплекс. Препринт ИФВЭ, 83—120, 1983; Труды 7-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. 1. Дубна, 1981.

геометрическому от 400 и 1,9 гигаэлектронвольт (учли, что масса ядра водорода равна 940 мегаэлектронвольтам), то есть всего 28 гигаэлектронвольт. Это значительно меньше начальной энергии. А ведь именно в поiske частиц со все большей массой покоя и состоит важнейшая задача эксперимента! Физики задумались, как поднять эффективность (физики даже говорят: коэффициент полезного действия) столкновений?

В 50-х годах одновременно в СССР Г. И. Будкером и в США В. Пановским был предложен принципиально новый метод реализации соударений частиц. Предлагалось сталкивать друг с другом два пучка на встречном движении, предварительно ускорив оба пучка.

При лобовом соударении равноускоренных частиц их суммарный импульс равен нулю. Поэтому и суммарный импульс продуктов реакции также нулевой, а, значит, импульс каждой частицы может быть малым. Закон сохранения импульса это разрешает. Невелика в этом случае и кинетическая энергия образовавшихся в реакции частиц. Поэтому почти вся суммарная энергия ускоренных начальных частиц может теперь перейти в массу покоя родившихся частиц. Если, как и в предыдущем примере, взять протоны с энергией в 400 миллиардов электронвольт и столкнуть их друг с другом, то суммарная энергия составит 800 миллиардов электронвольт, и вся она может пойти на образование новой частицы такой же большой массы. Это в 30 раз больше, чем при традиционной постановке эксперимента с неподвижной мишенью!

Значительным будет выигрыш в энергии и при встречном соударении двух электронных пучков. Так, при ускорении электронов до энергии в 20 миллиардов электронвольт, доступной в настоящее время, и столкновении их с нуклонами атомов покояющейся мишени максимальная масса рождающейся частицы не превышает 7 миллиардов электронвольт. В то же время в опыте со встречными пучками электронов может родиться частица с массой 40 миллиардов электронвольт. Это больше массы покоя почти всех известных частиц! Здесь выигрыш в массе будет шестикратным.

Идея встречных пучков была соблазнительной, но как ее реализовать на практике?

Новый метод стали разрабатывать одновременно в Институте ядерной физики Сибирского отделения АН

СССР в Новосибирске и в США в Стэнфордском центре линейного ускорителя. С 1965 года и там и там работали первые установки со встречными пучками ускоренных электронов с энергией в несколько сотен миллионов электронвольт.

Сейчас в Новосибирске работает уже четвертая установка такого типа, в которой сталкиваются ускоренные до 7 гигаэлектронвольт электроны и позитроны. Используются два пересекающихся ускорительных накопительных кольца. В одном из них накапливаются и ускоряются электроны, а в другом — позитроны (последние первоначально получают путем соударения ускоренных электронов с неподвижной мишенью). Накопительное кольцо имеет кольцевой вакуумпровод (труба, в которой поддерживается очень высокий вакуум), помещенный в сильное магнитное поле. В накопительное кольцо «впрыскивают» сгустками частицы из ускорителя, и в нем они удерживаются на круговой орбите в течение длительного времени (от нескольких секунд до многих часов). В течение этого времени из ускорителя в накопитель неоднократно вводятся частицы и таким образом накапливаются в нем. В современных установках накопленные частицы в том же накопителе и ускоряют до более высокой энергии.

Вращающиеся на орбите электроны и позитроны непрерывно излучают свет. Его даже от одного электрона достаточно, чтобы увидеть невооруженным взглядом. При хорошем вакууме в накопительном кольце время жизни частиц на орбите составляет десятки часов, и вы, придя на работу утром, можете обнаружить в кольце на «беговой» дорожке тот самый электрон или позитрон, который оставили накануне вечером. Когда электронов в накопителе становится много, пучок светится так ярко, что на него уже нельзя смотреть незащищенными глазами.

Сейчас работают накопительные кольца, в которых в одно и то же кольцо вводятся из ускорителя и электроны и позитроны. В нем они двигаются по окружности в противоположных направлениях. Плоскости орбит этих частиц слегка наклонены одна к другой, и пучки частиц за время существования в кольце многократно пересекаются в двух точках (десятки тысяч раз в секунду). Такое накопительное кольцо изображено на рис. 14.

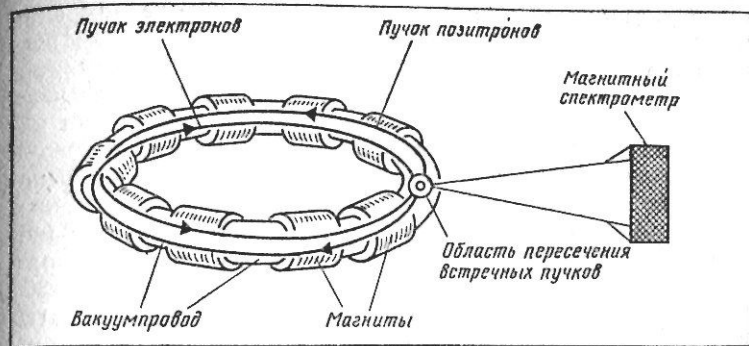


Рис. 14. Схема ускорительного накопительного кольца: пучки ускоренных электронов и позитронов движутся по орбитам в противоположных направлениях, пересекаясь в двух точках; продукты реакций регистрируются измерительной аппаратурой.

Возникает мысль, а не разваливаются ли пучки при столкновении? Нет. Дело в том, что вероятность взаимодействия одной частицы с другой настолько мала, что пучки пролетают насквозь, практически не «замечая» один другого, и частицы в пучках продолжают вращаться часами. Лишь несколько из сталкивающихся в пучках триллионов триллионов частиц могут провзаимодействовать одновременно, и продукты реакции регистрируются детекторами, поставленными вокруг точек встречи пучков.

В экспериментах на встречных электрон-позитронных пучках исследователи убедились в неизбежности закона электромагнитного взаимодействия на малых расстояниях — до 10^{-15} сантиметра (это расстояние в десятки миллионов раз меньше, чем размер атома).

Вершиной успеха экспериментов на встречных электрон-позитронных пучках стало открытие на накопительном кольце в Стэнфорде с энергией частиц 2,5 гигаэлектронвольта сперва пси-мезонов (ψ -мезонов, 1974 год), а затем тау-лептона (1975 год). Об открытии этих частиц рассказывается в одном из следующих разделов.

В настоящее время накопительные кольца электронов и позитронов имеются во многих странах мира.

С 1971 года в ЦЕРНе построены протон-антипротонные накопительные кольца. Как они работают? Сперва:

на протонном ускорителе получают путем соударения протонов с мишенью антипротоны, которые затем вводят в протонный синхротрон и ускоряют до 28 миллиардов электронвольт. Ускоренные антипротоны «впрыскиваются» в накопительное кольцо. После заполнения накопительного кольца в течение получаса оно готово к использованию. Затем в протонном синхротроне ускоряют до 28 миллиардов электронвольт протоны и вводят их во второе накопительное кольцо. В двух накопительных кольцах частицы двигаются в противоположных направлениях по окружностям диаметром 300 метров. Орбиты слегка деформированы и пересекаются 8 раз. В местах пересечения протоны и антипротоны сталкиваются, а продукты реакции регистрируются детекторами частиц.

С начала 80-х годов на основе протонного суперсинхротрона на 400 миллиардов электронвольт в ЦЕРНе реализованы протон-антипротонные соударения с энергией частиц по 270 миллиардов электронвольт. Об открытии на этой установке промежуточных W- и Z-бозонов рассказывается в следующей части книги.

Часть III.

Взаимодействия элементарных частиц

ГЛАВА 6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Наше проникновение в мир атомов можно сравнить с великими, полными открытий кругосветными путешествиями и дерзкими исследованиями астрономов, проникших в глубины мирового пространства.

Н. Бор

Квантовая теория взаимодействия электронов с фотонами

Квантовая электродинамика — это квантовая теория взаимодействия заряженных частиц как самих с собой, так и с электромагнитным полем. Важный ее раздел — квантовая механика электрона, рассчитывающая его движение с учетом взаимодействия с электромагнитным полем. Таким полем может быть поле ядра в атоме, поле других атомных электронов, собственное электромагнитное поле электрона.

Область применения квантовой электродинамики — расчет электронных оболочек атомов, спектров излучения или поглощения света атомами, рассеяние рентгеновских лучей, движение электрона или других заряженных частиц в электрических и магнитных полях, рассеяние электрона на электроне или позитроне и т. п.

Основы квантовой электродинамики заложены в конце 20-х годов трудами П. Дирака, В. Паули, Э. Ферми, Э. Шредингера.

Как и в квантовой механике, основное уравнение квантовой электродинамики — это уравнение Шредингера для системы частиц. Системе частиц отвечает волна, являющаяся наложением волн отдельных частиц. Отношение амплитуд волн системы частиц до и после реакции называют амплитудой реакции. Эту амплитуду находят, решая уравнение Шредингера.

Амплитуда реакции — основная величина в физике частиц. Ее квадрат и есть уже упоминавшаяся неоднократно вероятность реакции.

В квантовой электродинамике уравнение Шредингера решается для физических систем, содержащих заряженные частицы и фотоны. Вплоть до 40-х годов не было стандартного способа решения уравнения для таких частиц (а для участвующих не только в электромагнитном, но и в сильном взаимодействии нет и поныне). При расчете каждого электродинамического микропроцесса требовались месяцы изобретательных трудоемких математических вычислений. Решение каждой новой задачи даже получало имя автора исследования. Так, имя крупного индийского физика-теоретика Х. Баба носит формула для вероятности рассеяния позитрона на электроне, шведского физика О. Клейна и японского физика У. Нишины — формула для вероятности рассеяния фотонов электронами, немецких физиков Х. Бете и В. Гайтлера — выражение для вероятности излучения фотонов электроном при движении в веществе, датского теоретика К. Мёллера — формула для вероятности рассеяния релятивистского электрона на электроне.

Расчеты удавалось проводить с достаточно высокой точностью. Физики говорят: их точность не лучше величины α — постоянной тонкой структуры, которая равна отношению квадрата электрического заряда электрона к произведению скорости света на постоянную Планка:

$\alpha = e^2/\hbar c$. Численное значение постоянной α равно $1/137$.

Каким образом в расчетах квантовой электродинамики появляется постоянная α и почему она называется так — постоянная тонкой структуры?

Уравнение Шредингера для квантовой электродинамики — это просто запись на математическом языке квантовой механики того факта, что полная энергия физической системы (например, атома) равна сумме ее кинетической и потенциальной энергий. Потенциальная энергия атома в магнитном поле зависит от углового момента количества движения электрона. Поэтому спектральные линии излучения атомов в магнитном поле расщепляются и наблюдается тонкая структура спектров. Величина этого расщепления рассчитана немецким физиком-теоретиком А. Зоммерфельдом. Она оказалась пропорциональной постоянной α . Отсюда и возникло ее название «постоянная тонкой структуры».

Еще более точные расчеты (проведенные до второй мировой войны) показали, что решение уравнения Шредингера в квантовой электродинамике можно представить в виде бесконечной суммы членов геометрической прогрессии со знаменателем прогрессии α : $a_0\alpha + a_1\alpha^2 + a_2\alpha^3 + \dots$. Так вот, до начала 40-х годов физики могли рассчитывать только первое слагаемое в этом ряду. Что же происходило при расчете остальных слагаемых? Уже при вычислении второго члена геометрической прогрессии, составленной, например, для определения спектра излучения атома, получали бесконечно большую величину. То есть квантовая электродинамика оказывалась не в состоянии достаточно точно рассчитывать процессы. Более того, в ней фигурировали бесконечные, то есть абсурдные, величины. Это свидетельствовало о логических противоречиях в самих основах теории.

В середине 40-х годов физики-теоретики немец Ю. Швингер, японец С. Томонага, американец Р. Фейнман разработали способ вычислений, позволивший рассчитать второй член упомянутой геометрической прогрессии для любой задачи электродинамики. Американский физик Ф. Дайсон доказал справедливость способа для вычисления каждого члена прогрессии.

Оказалось, что бесконечные величины в теории возникают и при расчете массы и заряда электрона. Но если признать, что при вычислении массы и заряда теория

бессильна и во всех расчетах квантовой электродинамики заменять появляющиеся в них массу и заряд электрона просто на их экспериментальные значения, то никаких других бесконечных величин уже не будет. Это свойство теории называется перенормируемостью. Оно и было доказано Дайсоном.

Творцы современной квантовой электродинамики работали над ней независимо друг от друга. Томонага в Японии во время второй мировой войны руководил школой теоретической физики, которая в некоторых областях физики занимала ведущее место. На японском языке Томонага опубликовал свой фундаментальный труд. В то время Швингер занимался разработкой радиолокационных установок, а Фейнман рассчитывал атомную бомбу вместе с другими ведущими теоретиками.

Вернувшись после окончания войны к обычным академическим занятиям, Швингер и Фейнман заинтересовались результатами, только что проведенных экспериментов по измерению тонкой структуры излучения атома водорода. Они приступили, каждый по-своему, к созданию новой теории вместо той, которая, как уже было сказано, приводила к появлению бесконечных величин при вычислениях второго члена геометрической прогрессии. Они закончили свою работу независимо в течение зимы 1947/48 года как раз в то время, когда появился перевод на английский язык трудов Томонага, а его ученики стали приезжать в Америку. Интересно отметить, что если в размышлениях Швингера и Фейнмана решающую роль сыграло осмысливание экспериментальных данных, то Томонага сумел достичь аналогичных результатов, руководствуясь только теоретическими соображениями.

Что же они рассчитали?

Электрон имеет магнитный момент, пропорциональный спину и отношению заряда электрона к его массе. Коэффициент пропорциональности в этом соотношении называют g -фактором электрона. Если на атом водорода воздействовать магнитным полем, то энергия электрона в атоме несколько изменится. В зависимости от того, как ориентирован магнитный момент (или спин) электрона по отношению к магнитному полю (направлен по полю или против поля), энергия электрона меняется на разную величину. Поэтому вместо каждого значения энергии у атомов водорода в поле появляется несколько

ко энергетических состояний. Электроны могут переходить с одного уровня энергии на другой, излучая свет (сверхтонкое расщепление спектров). Швингер, Томонага и Фейнман вычислили разными способами частоты излучения света атомом водорода в магнитном поле и магнитный момент электрона (g -фактор) с точностью в тысячи раз лучшей, чем это было сделано до них. Расчеты оказались в блестящем согласии с новейшими послевоенными опытными данными.

Тот факт, что у истоков теории стоял не один, а сразу три исследователя, оказался плодотворным для ее развития. Каждый из них внес в создание квантовой электродинамики индивидуальность своего мышления, свой стиль работы, отчего теория выиграла как по глубине изложения, так и по широте обобщений.

Наиболее оригинальным был подход Фейнмана. Он создал новый метод расчета амплитуд реакций, основываясь на составлении по стандартным правилам некоторых графиков, получивших название фейнмановских диаграмм. О фейнмановских диаграммах расскажем в следующем разделе.

Отметим, что Томонага, Швингер, Фейнман не перестраивали здания квантовой электродинамики, заложенного еще Дираком, а только изменили математическую надстройку. В этом смысле их победа — это победа консерватизма. Они полностью сохранили физические основы теории. Доведя до совершенства математический аппарат расчетов, Фейнман, Швингер и Томонага доказали, что теория позволяет получать разумные результаты со сколь угодно большой точностью.

Квантовая электродинамика в том виде, который ей придали эти теоретики, прошла испытание временем в течение почти 40 лет. Она позволяет вычислять все измеряемые в электромагнитных процессах величины. Ее расчеты легли в основу целых областей физики — атомной физики, квантовой теории излучения и технологии лазеров, физики твердого тела, физики плазмы, оптической и микроволновой спектроскопии, электроники и квантовой химии.

За создание квантовой электродинамики Швингеру, Томонаге и Фейнману в 1965 году была присуждена Нобелевская премия.

Диаграммы Фейнмана

Каждый член упомянутой выше геометрической прогрессии со знаменателем (постоянной тонкой структуры) можно выразить в виде графика, составленного простым способом. Электрону на этом графике будет соответствовать отрезок прямой, фотону волнистая линия. Для члена геометрической прогрессии, пропорционального постоянной α в n -й степени, получится график из n вершин, соединенных в любом из возможных сочетаний линиями, отвечающими либо электрону, либо фотону. Но при этом нужно соблюдать следующие условия: все вершины должны быть точно с тремя линиями, две из которых отвечают электрону, одна — фотону; число и тип линий, не связывающих две вершины, а просто входящих в вершину, должны совпадать с числом и типом частиц в начале и в конце реакции.

На рис. 15 изображены, например, диаграммы Фейнмана с двумя и четырьмя вершинами для задачи рассеяния двух электронов. Этот процесс вообще можно выразить диаграммами только с четным числом вершин, графики с нечетным числом вершин здесь просто отсутствуют (их не нарисуеть по указанным правилам). Эти графики изображают рассеяние двух электронов (сплошные отрезки) с обменом фотонами (волнистые линии). Электроны могут обменяться разным числом фотонов, прежде чем окончательно разлетятся в стороны. Сумма всех этих процессов обмена разным числом фотонов определяет вероятность рассеяния электронов.

Наоборот, при рассеянии электрона в поле ядра удается построить диаграммы только с нечетным числом вершин. Они приведены на рис. 16. Треугольная диаграмма изображает процесс испускания электроном виртуального фотона, после чего электрон взаимодействует с электромагнитным полем ядра, обозначенного на рисунке крестиком, и вновь поглощает испущенный им ранее фотон. Эта диаграмма учитывает взаимодействие электрона с собственным электромагнитным полем. Впервые такой график рассчитал Швингер, что позволило ему точнее, чем ранее, определить магнитный момент электрона.

Правила Фейнмана составления диаграмм для электродинамических процессов настолько простые, что читатель сам может строить графики.

Самое замечательное, что диаграммы Фейнмана —

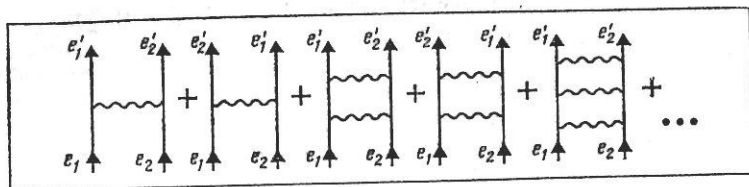


Рис. 15. Диаграммы Фейнмана для рассеяния электрона на электроне: волнистые линии — виртуальные фотоны, сплошные — электроны.

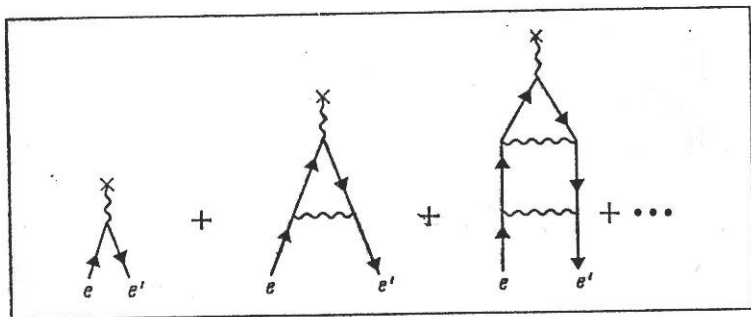


Рис. 16. Диаграммы Фейнмана с нечетным числом вершин для рассеяния электрона в поле ядра.

не просто картинки. Фейнман открыл следующую закономерность. Если каждый тип линии и вершину составленной таким способом диаграммы сопоставить с некоторыми математическими величинами, то их произведение для каждого графика будет соответствующим членом геометрической прогрессии — амплитуды реакции. А поскольку правила составления диаграмм несложные, то относительно легко находится и амплитуда микропроцесса. Физический смысл диаграмм Фейнмана состоит в том, что они изображают один из путей реализации реакции посредством виртуальных (то есть принципиально ненаблюдаемых) испусканий или поглощений фотона электроном, которым соответствуют вершины диаграмм.

Составляя фейнмановские диаграммы по простому правилу, можно сравнительно легко вычислять амплитуды и вероятности конкретных реакций.

Современный эксперимент и квантовая электродинамика

С конца 40-х годов вплоть до настоящего времени квантовую электродинамику проверяют в опытах разных типов со все более высокой точностью.

Одна из самых тонких проверок теории проведена в начале 80-х годов в Вашингтонском университете при измерении магнитного момента электрона (*g*-фактора).

Из уравнения Дирака для движения электрона следует, что *g*-фактор должен быть равен двум. Этот результат получается, если не учитывать возможное испускание и последующее поглощение электроном виртуальных фотонов. Однако Швингер учел взаимодействие электронов с таким собственным электромагнитным полем и рассчитал *g*-фактор точнее: он оказался равным 2,00232. Опыт подтвердил расчет. Это была первая поправка Швингера к величине *g*-фактора (или магнитного момента) электрона; к 1981 году физики вычислили 800 более сложных фейнмановских графиков с семью вершинами, соответствующих поправкам в миллиардную долю величины! Это удалось сделать только с использованием самых быстрых ЭВМ. В том же году измерение магнитного момента в точнейшем опыте полностью подтвердило расчеты.

Еще одну проверку теории дают опыты по рассеянию электронов на электронах или позитронах во встречных пучках накопительных колец с энергиями частиц в десятки гигаэлектронвольт. В этих опытах измеряют вероятности рассеяния частиц. Правда, здесь квантовая электродинамика проверяется с меньшей точностью, чем при измерении магнитного момента электрона, но зато в области очень малого расстояния между соударяющимися частицами. Согласно соотношению неопределенностей это расстояние определяется как отношение постоянной Планка к импульсу, который при столкновении одна частица передает другой. Вывод из опытов — теория верна по крайней мере до расстояния в тысячные доли ферми (напомним читателю, что 1 ферми равен десяти-триллионной части сантиметра, это размер нуклона).

Загадка тяжелых родственников электрона

Существование в природе мюона — это до сих пор для физиков загадка. Его движение, так же как и электрона, определяется уравнением Дирака, только с другим

значением массы частицы. Как и электрон, мюон участвует лишь в электромагнитном и слабом взаимодействиях. Поэтому мюон воспринимается физиками как дублер электрона, более тяжелый, чем сам электрон. Его так и называют «тяжелый электрон». Необходимость существования мюона ни откуда не следует. Зачем природе понадобился мюон?

Как и электрон, мюон может захватываться ядром атома на оболочку и образовывать новый тип атома, называемый мезоатомом. Это явление наблюдается при бомбардировке атомов отрицательно заряженными мю-мезонами.

Мезонные атомы нестабильны. За короткое время мюон переходит с орбиты, на которую был захвачен, на более близкую к ядру орбиту, а затем поглощается ядром или сам распадается в течение микросекунды. При переходе мезона на более низкие уровни возбуждения в атоме разница энергий начального и конечного состояний атома выделяется в виде гамма-кванта. Это так называемые мезорентгеновские лучи, аналогичные рентгеновским, но с гораздо большей энергией квантов.

Советские физики М. Я. Балац, Д. Ф. Зарецкий, Б. М. Понтекорво, Л. Н. Кондратьев, Л. Г. Ландсберг, П. И. Лебедев и Ю. В. Обухов сначала теоретически предсказали, а затем и наблюдали переход мюона в мезоатомах урана и плутония без излучения гамма-квантов. Энергия мезоатома целиком передавалась ядру. Это явление безрадиационных переходов в мезоатомах удостоено диплома открытия.

Известно, что позитрон с электроном могут образовывать короткоживущий атом, называемый позитронием. Ядро позитрония — положительно заряженный позитрон. Аналогично и положительно заряженный мюон может образовать вместе с электроном атом. Ядро такого атома, называемого мюонием, — мюон, а электрон вращается вокруг него.

Мюоний — это легкий радиоактивный изотоп водорода, не существующий в земных условиях. Он образуется, когда положительно заряженный мюон проходит через вещество. При торможении в среде мюон отрывает электрон у одного из атомов и образует вместе с ним этот самый мюоний — необычный атом, живущий короткое время.

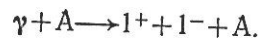
В отличие от электрона мю-мезон распадается в сред-

нем за микросекунду на электрон, нейтрино и антинейтрино. Но этот распад не является следствием какого-либо неизвестного ранее взаимодействия. Мюон распадается потому, что имеет массу больше массы электрона. Его распадом «управляет» слабое взаимодействие.

Итак, мы не знаем еще, по какой причине мюон похож на электрон. Вместе с тем физики допускают, что это не исключение: вероятно, существуют и другие «родственники» электрона. По крайней мере, один из них найден. Об этом расскажем ниже.

Многие годы искали лептоны с массой меньше массы мюона, но не нашли. Возник вопрос: нет ли продолжения ряда $e-\mu$ в сторону еще больших масс? В 70-х годах стали придерживаться точки зрения, что электрон, нейтрино — только самые легкие члены семейства лептонов, а лептонный мир так же разнообразен, как и мир адронов.

В 1959 году в ФИАНЕ, а в 60-х годах в Стэнфордском центре линейного ускорителя были проведены опыты по рождению гипотетических лептонов гамма-квантами с энергией в сотни мегаэлектронвольт. Теоретически реакция записывалась так:



Гамма-квант в поле ядра A рождает пару лептонов l^+ и l^- противоположных знаков (частицу и античастицу). Из-за небольшой энергии могли рождаться только лептоны с массой до 100 мегаэлектронвольт. Однако опыты закончились безрезультатно: новых частиц с такой массой не нашли. Американские физики, экспериментировавшие с гамма-квантами большей энергии, что позволяло искать лептоны с массой, близкой массе протона (то есть миллиарда электронвольт), так же не добились успеха.

В начале 70-х годов в ИФВЭ (Серпухов) в опытах по соударению протонов с мишенью искали тяжелый лептон с массой до 5 протонных масс и временем жизни более 10 наносекунд. В Италии для поиска лептонов использовали встречные пучки электронов и позитронов с суммарной энергией до 3 миллиардов электронвольт. Новые лептоны и в этих экспериментах не были найдены.

В 1972—1973 годах в Стэнфорде в нескольких теоретических работах рассматривались свойства гипотетического тяжелого лептона. Исходя из полной тождествен-

ности такого лептона электрону и мюону, теоретики считали его время жизни и длину пробега как функцию массы. Время жизни лептона обратно пропорционально 5-й степени его массы. Поэтому если мюон живет микросекунду, то гипотетический лептон с массой в две протонные массы мог жить только 10^{-13} секунды, а затем должен был распасться на мюон или электрон с рождением нейтрино и антинейтрино. Позднее была предпринята серия опытов по экспериментальной проверке теоретических расчетов. Работа велась на интенсивном пучке гамма-квантов с энергией в 18 миллиардов электронвольт. Поиск новой частицы с определенной массой и временем жизни требует специальной постановки опыта, предназначенной именно для регистрации частицы с заданными свойствами. Исследователи из Стэнфорда использовали для этой цели газовые черенковские счетчики. Установка позволяла зарегистрировать частицы с массой вплоть до массы протона и со временем жизни, не меньшим 10 наносекунд. Новый лептон был бы найден даже при вероятности его образования в миллионы раз меньшей, чем вероятность рождения мюона. Но ничего интересного все равно не нашли.

Очередной тур поисков начался в Стэнфорде в связи с пуском в 1974 году пересекающихся накопительных колец со встречными пучками электронов и позитронов с энергией 2,5 миллиарда электронвольт. Для детектирования заряженных частиц физики сконструировали многоцелевую измерительную установку: цилиндрический детектор диаметром и длиной 3 метра, который помещался в соленоид с магнитным полем в тысячи гаусс. Область пересечения встречных пучков электронов и позитронов находилась в центре детектора. С помощью этого измерительного устройства и была открыта реакция с рождением двух гипотетических лептонов, обозначаемых буквой τ (тау):



Тяжелый тау-лептон зарегистрировать непосредственно нельзя, так как он распадается очень быстро либо на электрон, нейтрино и антинейтрино, либо на мюон с парой нейтрино и антинейтрино.

Если бы тау-лептон не рождался, то детектор зарегистрировал бы либо пару мюонов противоположных знаков, либо электрон и позитрон. И только при рожде-

нии и распаде тау-лептонов должны появляться смешанные пары электрон — мюон или позитрон — мюон. Это связано с тем, что один из родившихся тау-лептонов мог распасться с образованием мюона, а другой в то же время — с образованием электрона или позитрона.

Опыт показал: при столкновении электрона и позитрона с суммарной энергией, меньшей 3,5 гигаэлектронвольта, наблюдаются случаи одновременного детектирования пар лептонов только одного типа, но при энергии в 4 гигаэлектронвольта картина меняется — приборы начинают регистрировать и смешанные электрон-мюонные и позитрон-мюонные пары. Это доказывало, что образуются новые лептоны с массой в половину пороговой энергии — 2 гигаэлектронвольта.

В описанном опыте измерялась энергия каждой частицы. Измерения показали, что суммарная энергия регистрируемых лептонов меньше энергии начальных частиц. Часть энергии где-то терялась. Где же? Ответ напрашивался один: это «дело рук» неуловимой частицы нейтрино.

Так подтвердился факт распада тау-лептона.

Тау-лептон — это третий известный нам тип лептонов.

Открытие сделано в 1975 году коллективом из 36 человек во главе с М. Перлом.

В 1977 году эксперимент повторили немецкие ученые в Гамбурге. Ими были измерены точные значения массы и времени жизни тау-лептона — соответственно 1807 мегаэлектронвольт и 0,5 триллионной доли секунды. Позднее там же наблюдались и распады этой частицы с образованием адронов.

Симметрия между лептонами требует, чтобы у нового лептона было «свое» тау-нейтрино. Есть ли у него масса? Опыты позволяют пока только сделать заключение, что масса этого нейтрино меньше 250 мегаэлектронвольт.

Но... появление нового тяжелого родственника электрона и мюона не решило саму загадку существования того семейства. Дело за новыми опытами и теорией.

ГЛАВА 7. СЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И РАСПАДЫ

Математик любит прежде всего симметрию.
Д. Максвелл

Нарушение симметрии в микромире

Слабое взаимодействие ответственно за распады частиц, долго живущих по сравнению с ядерным масштабом времени (10^{-23} секунды), — мезонов, гиперонов, нейтрона. При бета-распаде ядер связанный в ядре нейтрон переходит в протон, электрон и антинейтрино. Время жизни мезонов и гиперонов — от миллионной до миллиардных долей секунды; время жизни нейтрона и бета-активных ядер значительно больше — от секунд до тысяч лет. Большое время жизни означает малую вероятность распада. Это и характерно для слабого взаимодействия.

В распадах частиц обнаружилась удивительная вещь: они протекают с нарушением некоторых типов симметрии физических процессов, что абсолютно невозможно в реакциях, управляемых сильным и электромагнитным взаимодействиями. И тут нам придется коротко поговорить о том, что такое симметрия микромира и каким законам она подчиняется.

Интуитивно каждый из нас представляет себе, что такое пространственная симметрия. Окружающий нас мир заполнен симметричными объектами, созданными природой. Самый симметричный объект — это сфера. И природа дает нам много примеров сферических тел: звезды, планеты, капельки воды и т. д. А сколько типов симметрии находим мы в кристаллах горных пород! Полон симметрии животный и растительный мир, хотя симметрия цветка или бабочки уже не столь совершенна, как симметрия сферы или кристалла. Выдающийся математик XX столетия Г. Вейль видит в природной симметрии проявление глубокой физической сущности — односторонней направленности процессов в системах большого числа микрочастиц к состоянию равновесия: «...Мы должны осознать, что симметрия присуща общей организации природы... все же удивительно, до какой степени она распространена. Для этого должна быть какая-то причина, и ее нетрудно отыскать: состояние равновесия должно быть, по-видимому, симметричным»*.

В настоящей главе речь пойдет о симметрии фундаментальных законов, которые управляют всеми физическими процессами.

Оказывается, когда мы говорим о симметрии объекта, то всегда нужно добавлять, относительно чего он остается симметричным. Симметрия — это неизменность физического объекта или процесса относительно некоторого действия с ним. Так, шар совпадает сам с собой при повороте вокруг любой оси, проходящей через его центр. Однородное пространство симметрично — объекты не изменяются при переносе в пространстве. Если мы в некотором месте поставим физический опыт, а затем перенесем измерительную установку в другое место и повторим опыт, то его результаты должны повториться. Свойство симметрии пространства позволяет предположить неизменность физических законов во всей Вселенной, за исключением областей с сильным гравитационным полем, нарушающим однородность пространства. При повторении опыта необходимо, конечно, сохранить все существенные для него условия и детали окружения.

Механика позволяет малому числу частиц совершить движение в обратном направлении и вернуться к исходному состоянию. Поэтому про механическое движение малого числа частиц говорят, что оно симметрично относительно обращения времени.

Однако механическое движение очень большого числа частиц — например, молекул в газе, где их миллионы, — не обладает такой симметрией: газ всегда заполняет весь объем и способен самопроизвольно только расширяться, теряя при этом тепло. Закономерности движения большого множества частиц изучает статистическая механика.

Под временной симметрией понимают и то, что если вы сделаете сегодня опыт, а затем проведете его при тех же условиях завтра, то результат эксперимента должен повториться. Однако и здесь следует сделать оговорку. Это все верно для физических систем с малым числом частиц — одной, двумя, тремя... Но симметрии уже нет, если результат опыта зависит от многих неизвестных причин или исследуются свойства многих частиц.

Физика элементарных частиц изучает свойства малого числа частиц, и все физические процессы в микромире обладают временной симметрией. Только в 1964 году открыли два случая распада частиц, в которых это свой-

* Вейль Г. Симметрия. М., Наука, 1968, с. 55.

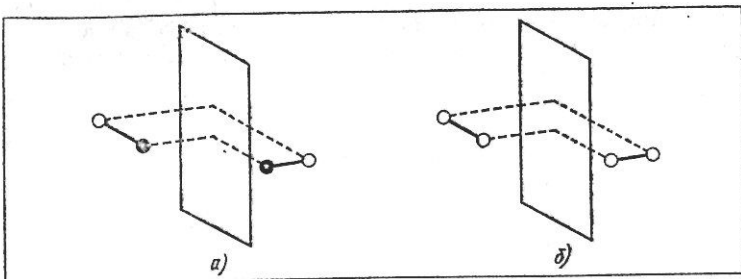


Рис. 17. Зеркальное отражение пространственно несимметричного предмета (а); зеркальное отражение пространственно симметричного предмета (б)

ство нарушается. Об этом расскажем несколько ниже.

Известна зеркальная симметрия. При обращении направлений координатных осей физическая система не меняется, если она обладает зеркальной симметрией. Название симметрии происходит из того, что отражение в зеркале предмета эквивалентно изменению направления координатных осей на противоположное. На рис. 17, а изображена несимметричная палочка с двумя шариками, правый — черный, левый — светлый. После отражения в зеркале левый и правый шарики поменялись местами. Получился предмет, отличный от первоначального. Это произошло потому, что палочка с разноцветными шариками не обладает зеркальной симметрией. Совсем по-другому обстоит дело в случае, показанном на рис. 17, б, когда имеем оба одинаковых шарика. После отражения в зеркале палочка ничем не отличается от прежней, что связано с ее зеркальной симметрией.

Существует еще важный тип симметрии — это зарядовая симметрия. Она означает действие одних и тех же законов как для частиц, так и для античастиц.

Чтобы понять субъективность различия между левым и правым, рассмотрим такой пример. Допустим, мы связались по радио с инопланетянами, научились понимать друг друга и сумели объяснить, как выглядим. Например, объясняем так: «Мой рост составляет 17 миллиардов диаметров атома водорода». Это как раз будет 175 сантиметров (диаметр атомов одинаков во всей Вселенной). Вы сможете объяснить, что у человека четыре конечности с пятью отростками, называемыми пальцами;

в теле находятся внутренние органы, например сердце. Но попробуйте объяснить, что сердце у вас слева. Тут-то ничего и не получится. Вы не сможете разъяснить инопланетянину словами, что такое левое, а что правое.

Теоретически признается, что все физические процессы должны быть симметричны относительно пространственных координат, времени и зарядов частиц при одновременном обращении их на противоположные.

Согласно теории нет необходимости существования по отдельности каждого из видов симметрии. Тем не менее опыт показывает, что все процессы, управляемые электромагнитным или сильным взаимодействием, обладают этими видами симметрии порознь.

Особый интерес к симметрии в физике связан с тем, что существует потрясающий по своей глубине и красоте факт — каждому типу симметрии соответствует некоторая сохраняющаяся физическая величина. Есть связь между законами сохранения и симметрией физических процессов. Так, симметрия однородного пространства приводит к закону сохранения импульса, симметрия физического процесса относительно смещения во времени — к сохранению энергии; симметрия относительно вращения в пространстве — к закону сохранения момента количества движения.

В квантовой механике к этим законам симметрии добавляется и сохранение квантовых чисел, называемое четностью. Соответственно трем типам симметрии — относительно обращения координат, времени, заряда — различают и три разновидности четностей — пространственную, временную и зарядовую.

Как они определяются?

Каждая частица имеет поле. Если при отражении координат никаких изменений с потенциалом поля не происходит, разве меняется лишь его знак, то говорят, что частица обладает четностью. Если потенциал не меняет знака, то четность положительная, а если меняет, то отрицательная. Положительная четность частицы характеризуется числом $+1$, а отрицательная — числом -1 . Тогда четность системы микрочастиц — это произведение четностей каждой частицы.

Свойством четности обладают и физические величины. Так, импульс меняет знак при обращении координат, о нем говорят как о нечетной функции. Наоборот, спин, как и всякий момент количества движения, — чет-

ная функция координат. Спин не меняет знака при обращении координат.

Замечательное свойство четности, или, точнее, пространственной четности, о которой здесь идет речь, — это ее сохранение при всех электромагнитных и сильных взаимодействиях частиц. Вот потому-то четность и приобрела такое значение в физике микромира.

У пиона четность отрицательная. Допустим, частица распадается на два пиона. Тогда можно предполагать, что она не распадется на три пиона потому, что у трех пионов четность отрицательная, а это запрещено законом сохранения четности. Другой пример: при рассеянии двух пионов (одного на другом) образуется только четное число пионов, а рождение нечетного числа низкоэнергетических пионов запрещено сохранением пространственной четности.

Аналогично пространственной четности определяются и временная, и зарядовая четности.

До середины 50-х годов предполагалось, что четности сохраняются во всех процессах, в том числе в распадах частиц. Но физика слабого взаимодействия преподнесла сюрприз.

С начала 50-х годов в течение нескольких лет физики пытались разрешить загадку существования так называемых тау- и тета-мезонов (τ -мезон и θ -мезон). Оба нейтральные, они имели одну и ту же массу и время жизни. Но тау-мезон распадался на два, а тета-мезон — на три пиона. Это означало, что четности обеих частиц различны. Поэтому и частицы рассматривали как разные.

Но чем в таком случае объясняется равенство масс, времен жизни?

Ответ нашли американские физики-теоретики Т. Ли и Ч. Янг в 1956 году. Они выдвинули смелое утверждение о возможном несохранении четности в слабом взаимодействии, а тау- и тета-мезоны предложили считать одним и тем же нейтральным K -мезоном. Несохраниение четности затем было подтверждено экспериментально в опыте сотрудницы Колумбийского университета в США Ц. Ву. Она измерила направление спина электронов, вылетающих во время бета-распада ядер кобальта-60. Кобальт помещали при сверхнизкой температуре в сильное магнитное поле. Спин почти каждого ядра выстраивался по направлению магнитного поля,

что соответствовало минимальной потенциальной энергии ядра. Низкая температура ядер была нужна для того, чтобы тепловые колебания атомов не слишком мешали атомным «магнетикам» выстраиваться вдоль магнитного поля. Регистрация электронов от бета-распада таких поляризованных ядер (то есть с ориентированным в пространстве спином) показала, что спин электронов направлен против их вылета. Из законов сохранения импульса и момента количества движения следовало: спин вылетающих при распаде антинейтрино направлен по их импульсу. Если спин рассматривать как момент количества движения, соответствующий вращению вокруг оси, направленной по импульсу, то антинейтрино получалось правовинтовым, а нейтрино — левовинтовым.

Пространственная симметрия явно оказалась нарушенной.

В 1957 году Ли и Янгу была присуждена Нобелевская премия за открытие несохранения четности в слабом взаимодействии.

Нарушение пространственной симметрии открывает как будто возможность объяснить инопланетянину, где у нас расположено сердце — справа или слева. Мы бы ему могли сказать так: «На Земле нейтральная частица в ядре (нейтрон) распадается с испусканием неуловимой частицы (антинейтрино), у которой спин направлен по импульсу. Если вращением перемещать винт по направлению спина антинейтрино, то винт будет двигаться также по направлению импульса только при условии правовинтовой нарезки».

На самом же деле все обстоит не так просто. Объясняя инопланетянину различие между «правым» и «левым», мы рискуем попасть в ловушку. А вдруг инопланетянин состоит не из вещества, а из антивещества? Тогда у него нейтральная частица в ядре — не нейтрон, а антинейтрон. При распаде же антинейтрона образуется не антинейтрино, а нейтрино. Все же нейтрино левовинтовые. Поэтому то, что мы назвали инопланетянину правым, в действительности будет левым. Ну а разобратся с инопланетянином в том, из одного ли вещества мы с ним «сделаны» или мы — из вещества, а он — из антивещества, окажется совершенно невозможно (впрочем, об этом у нас еще будет разговор).

Отсюда вывод: объективное различие между левым и правым исчезает, если не принимать во внимание

факт, что есть вещество и антивещество. Снова возникает симметрия!

Тотчас же с открытием несохранения пространственной четности в распадах выдающимся советским теоретиком Л. Д. Ландау, пакистанским физиком А. Саламом и теми же Ли и Янгом одновременно и независимо была высказана мысль, что симметрия в микромире восстанавливается, если наряду с обращением направлений координатных осей менять частицы на античастицы. Такую симметрию назвали комбинированной. Ей соответствует комбинированная четность — произведение пространственной и зарядовой четностей. Опыт показал, что комбинированная симметрия имеет место в слабом взаимодействии. Это означает, что мы не сможем одновременно отличить левое от правого, вещество от антивещества.

Казалось бы, уж теперь за симметрию можно не беспокоиться. Увы! Изучение распадов нейтральных K -мезонов принесло в 1964 году новый сюрприз.

Что было известно о K -мезонах к началу 60-х годов? Нейтральный каон (K^0 -мезон) и его античастица различаются только одним квантовым числом — знаком странности S . Странность сохраняется при рождении частиц. Мы уже говорили, что она была введена в теорию для объяснения парного рождения странных частиц с разными знаками их странности. У K^0 -мезона странность $S = +1$, а у \bar{K}^0 -мезона $S = -1$. Это «небольшое» различие приводит к совершенно различному взаимодействию K^0 - и \bar{K}^0 -мезонов с веществом. Если на мишень падает K^0 -мезон, то из-за сохранения в реакции его отрицательного значения странности относительно легко рождаются гипероны, также имеющие отрицательную странность. Если же на вещество падает \bar{K}^0 -мезон, странность которого положительная, то он в основном упруго рассеивается, так как нет других мезонов или гиперонов с положительной странностью и они не рождаются. Поэтому \bar{K}^0 -мезоны сильно поглощаются веществом по сравнению с K^0 -мезонами.

А как распадаются нейтральные каоны?

Можно показать, что K^0 - и \bar{K}^0 -мезоны не обладают каждый в отдельности комбинированной симметрией. Однако считалось, что комбинированная симметрия в распадах сохраняется. Отсюда немедленно следовал вы-

вод о том, что K^0 - и \bar{K}^0 -мезоны просто не распадаются. Но сумма и разность полей двух нейтральных K^0 -мезонов обладают комбинированной симметрией. Сумма и разности полей отвечают новые поля, названные K^0_1 - и K^0_2 -мезонами. Каждый из них уже может распадаться. K^0_1 -мезон имеет положительную комбинированную четность и потому распадается точно на два пиона, K^0_2 -мезон имеет отрицательную комбинированную четность и распадается на три пиона. Распад на два пиона идет с большей вероятностью, чем на три. Поэтому K^0_2 -мезон в среднем живет в тысячу раз дольше, чем K^0_1 -мезон. Распад долгоживущего K^0_2 -мезона на два пиона считался запрещенным из-за сохранения комбинированной симметрии.

И вдруг...

В опытах 1964 года Д. Кронин и В. Фитч из Принстонского университета (США) получили K^0 -мезоны бомбардировкой бериллиевой мишени ускоренными до 30 гигаэлектронвольт протонами на ускорителе в Брукхэйвене. Изучался распад нейтральных каонов. Пучок K^0 -мезонов состоит в равном количестве из K^0_1 - и K^0_2 -мезонов. K^0_1 -мезоны распадались на расстоянии всего в несколько десятков сантиметров, а дальше уже летел чистый пучок K^0_2 -мезонов. И совершенно неожиданно оказалось, что на расстоянии 19 метров от мишени были в заметном количестве обнаружены распады K^0_2 -мезонов на два пиона. Это означало, что долгоживущий K^0_2 -мезон может распадаться не на три, а на два пиона с несохранением комбинированной симметрии. Доля таких распадов составляет всего десятую часть процента. Но и этого оказалось достаточно для того, чтобы навсегда рухнула вера в строгое безусловное выполнение очередного закона сохранения!

Через несколько лет открыли отсутствие сохранения комбинированной симметрии и в другом распаде нейтральных каонов — на пион, лептон и нейтрино. Вероятность распада долгоживущего K^0_2 -мезона на отрицательно заряженный пион, позитрон и нейтрино оказалась на треть процента больше вероятности комбинированно симметричной реакции — распада на положительно заряженный пион, электрон и антинейтрино. Хотя разница и мала, но отражает наличие абсолютного различия между веществом и антивеществом.

Интересно, что за 20 лет, прошедших после открытия

несохранения комбинированной симметрии, это явление не наблюдали больше ни в каких других процессах.

За открытие эффекта Кронин и Фитч в 1980 году получили Нобелевскую премию.

До 1964 года никто из физиков не знал, какой формой должны были обмениваться разумные существа из разных миров, чтобы понять, кто из них живет в мире, а кто — в антимире. Радиоволны истинно нейтральны и не несут информации о различии миров. После 1964 года стало ясно, что при установлении контактов с инопланетянами можно выяснить, из какого вещества они состоят. Для этого надо узнать, как распадается существующая в «их» мире тяжелая нейтральная частица со временем жизни десятиллионной долей секунды (мы ее называем K^0_2 -мезоном). Если она с большей вероятностью распадается так, что образуется практически не взаимодействующая с веществом легчайшая нейтральная частица со спином $1/2$ (нейтрино), спин которой направлен против импульса, то мир инопланетянина — это мир из вещества, как и на Земле. Если же «их» нейтрино имеет спин, направленный по импульсу, то это антимир. Нашему, земному космическому кораблю подлетать к планете из антивещества равносильно самоубийству: непременно произойдет взрыв, по силе в сотни раз превосходящий взрыв термоядерного устройства.

Исследования советских физиков по несохранению четности

С конца 50-х годов в ИТЭФ под руководством А. И. Алиханова также был проведен цикл работ по исследованию несохранения четности. Измеряли среднюю ориентацию спинов электронов бета-распада радиоактивных ядер и спинов мюонов от распада пионов*. Было установлено, что ориентация спинов частиц в пространстве зависит от скорости частиц, что подтвердило несохранение зеркальной симметрии. Нарушение симметрии связано в данном случае с тем, что вероятность распада зависит от произведения спина частицы на ее скорость, которое меняет свой знак при обращении координат.

* См.: Проблемы ядерной физики и физики элементарных частиц. — В сб.: Памяти А. И. Алиханова. М., Наука, 1975.

В ИТЭФ исследовали вопрос: является ли слабое взаимодействие универсальным, то есть присуще ли оно всем частицам, в том числе и сильно взаимодействующим? Для этого на реакторе ИТЭФ был выполнен ряд опытов с так называемыми поляризованными нейтронами, спин которых имеет преимущественную ориентацию в пространстве. Здесь искали проявление слабого взаимодействия в электромагнитных переходах ядер из возбужденного состояния в основное — невозбужденное. Характерное для слабого взаимодействия несохранение четности должно привести к малой угловой асимметрии излучения гамма-квантов при захвате ядрами поляризованных нейтронов. Проблема состояла в том, чтобы найти процессы, в которых влияние слабого взаимодействия было бы значительно усилено, и разработать методы измерения очень малых эффектов.

К осуществлению опытов этой серии ученые ИТЭФ приступили в 1961 году. Для получения нейтронов использовался построенный в конце 40-х годов под руководством А. И. Алиханова и В. В. Владимирского первый в нашей стране тяжеловодный исследовательский ядерный реактор. Мощность реактора составляет 2,5 мегаватта. Он дает более 10 триллионов нейтронов в секунду на квадратный сантиметр в центре активной зоны. Нейтроны образуются путем деления изотопа урана-235. В реакторе имеется 9 горизонтальных каналов для нейтронных пучков. На одном из таких каналов облучали нейтронами природный кадмий, интенсивно захватывавший нейтроны. Образовывались возбужденные ядра кадмия-114 с энергией возбуждения 9 мегаэлектронвольт. Переход ядра в основное состояние сопровождался вылетом гамма-кванта. Изучалась асимметрия вылета таких квантов по отношению к ориентации спина нейтронов.

Испускаемые в результате захвата нейтронов гамма-кванты регистрировались двумя одинаковыми сцинтилляционными спектрометрами с кристаллами йодистого натрия размером в несколько сантиметров. Гамма-кванты вызывали в кристалле световой импульс, который преобразовывался в импульс электронов в катод фотоэлектронного умножителя.

Асимметрия ожидаемой величины в сотые доли процента была обнаружена.

Эксперимент повторяли трижды, и каждый раз на

модернизированных установках, в 1964, 1967 и 1971 годах. Эффект воспроизводился полностью, что позволило с достоверностью сделать вывод о присутствии слабого взаимодействия в электромагнитных процессах в ядрах.

Результаты опыта ИТЭФ подтвердились в экспериментах группы американских физиков в 1972 году.

Вслед за физиками ИТЭФ к аналогичному заключению о существовании слабого взаимодействия у нуклонов в ядрах пришла группа исследователей Ленинградского института ядерной физики им. Б. П. Константинова (ЛИЯФ). В их опытах 1966 года несохранение четности определялось подсчетом относительного числа рождающихся при распаде радиоактивных ядер гамма-квантов с двумя противоположными направлениями вращения векторов напряженностей электромагнитной волны. Радиоактивные ядра получали при захвате нейтронов реактора. Асимметрия была обнаружена.

За обнаружение и исследование фундаментального явления — несохранения четности в ядерных переходах (на эту работу ушло почти 10 лет!) Ю. Г. Абов, П. А. Крупчицкий (ИТЭФ) и В. М. Лобашев, В. А. Назаренко (ЛИЯФ) награждены в 1974 году Ленинской премией. Первооткрыватели явления — физики ИТЭФ — получили диплом за открытие.

В конце 70-х годов на реакторе ИТЭФ В. А. Андреевым, В. В. Владимирским, Г. В. Даниляном и другими сотрудниками было установлено, что слабое взаимодействие нуклонов в ядре приводит к асимметрии разлета нейтронов и осколков деления ядер урана и плутония (при захвате поляризованных нейтронов реактора). Оказалось, что на ядрах урана легкий осколок испускается преимущественно по направлению спина захваченного ядром нейтрона, а при делении ядер плутония — против направления спина. Измеренная в опыте величина асимметрии разлета осколков, составляющая сотую долю процента, свидетельствует о наличии слабого взаимодействия в ядре еще до разлета осколков. Этот факт может пролить новый свет на сам процесс деления ядер.

Дальнейших успехов физика слабого взаимодействия достигла на пути объединения с квантовой электродинамикой.

Единство природы электромагнитных и слабых сил

Первостепенная задача теории состоит в поиске единой причины существования частных явлений и уменьшения числа независимых исходных положений. Нахождение единых принципов построения теории различных эффектов приводит к объединению их в одной цельной картине. На первый взгляд кажется, что общего между электромагнитным взаимодействием заряженных частиц и слабым взаимодействием мало. Определенная параллель появляется, если обратить внимание на то, что оба взаимодействия сохраняют свой тип заряда и оба универсальны: порядок величины вероятностей электромагнитных процессов определяется зарядом электрона e для всех заряженных частиц, и одна постоянная G управляет всеми типами распадов долгоживущих лептонов и адронов.

В 1957 году Швингер объяснил это свойство универсальности обоих взаимодействий. Он предположил, что по аналогии с электромагнитным взаимодействием слабое взаимодействие также определяется обменом квантами некоего поля со спином (напомним, что у фотона спин равен единице). Новые гипотетические кванты называли промежуточными дубль- W -бозонами (бозонами называют частицы с целым спином). Если W -бозон действительно существует, то акт слабого взаимодействия можно рассматривать как два последовательных трехчастичных акта с переносом электрического заряда из одной точки пространства в другую заряженным промежуточным бозоном: сперва нейтрон переходит в протон с испусканием W^- -бозона, а затем W^- -бозон распадается на электрон и антинейтрино: $W^- \rightarrow e + \bar{\nu}_e$. Распаду соответствует диаграмма Фейнмана на рис. 18, *а, в*. В электромагнитном же взаимодействии элементарный акт изображается трехлучевой вершиной — рис. 18, *б* (см. также рис. 15 и 16).

Поскольку все наблюдавшиеся в 50-е и 60-е годы слабые процессы были связаны с передачей заряда от нуклона лептону и наоборот, то предполагалось существование только двух разновидностей переносчиков слабого взаимодействия — отрицательно и положительно заряженных бозонов: W^- - и W^+ -бозонов. Действительно, бета-распад нейтрона, в результате которого рождаются протон, электрон и антинейтрино, происходит с передачей заряда нейтрону как бы налетающим на него по-

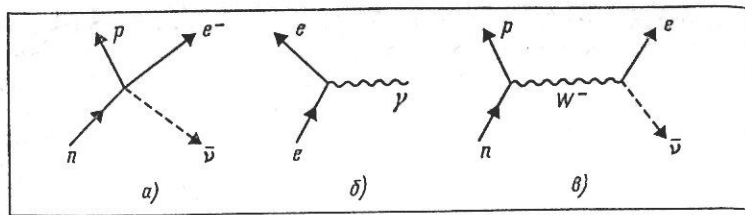


Рис. 18. График Феймана для бета-распада нейтрона в соответствии с слабой теорией (а); трехлучевая вершина, соответствующая элементарному акту в электродинамике (б); акт электрослабого взаимодействия: нейтрон переходит в протон с испусканием W^- -бозона, затем бозон распадается на электрон и антинейтрино (в)

зитроном. Нейтрон превращается в протон, а позитрон — в антинейтрино.

Сразу же после предсказания бозона во всем мире развернулись экспериментальные работы на ускорителях высоких энергий по поиску этой частицы. Масса бозона первоначально не предсказывалась. Проведенные в СССР и за рубежом исследования показали, что эти гипотетические бозоны если и существуют, то имеют массу много больше нуклонной, и энергии существующих ускорителей недостаточно для их рождения.

В 1959 году аналогию между электромагнитным и слабым взаимодействием развил Ш. Глэшоу (Институт ядерной физики в Копенгагене). Он выдвинул гипотезу о тождественности обоих взаимодействий при сверхвысоких энергиях — сотни гигаэлектронвольт. Из гипотезы следовало, что постоянная взаимодействия при такой энергии, соответствующая трехлучевой вершине элементарного акта взаимодействия (рис. 18, а, б), — это один и тот же электрический заряд электрона. Слабое взаимодействие по новой теории определяется при низких энергиях величиной отношения квадрата заряда электрона к квадрату массы W -бозона. Приравняв это значение постоянной слабого взаимодействия G , Глэшоу впервые оценил массу W -бозона. Его оценки дали значение массы около 30 гигаэлектронвольт. Стало ясно: чтобы обнаружить частицу с такой большой массой, нужны ускорители, на которых частицы разгонялись бы до энергий в сотни гигаэлектронвольт. Такие ускорители появились только в 80-е годы.

Из аналогии между электромагнитным и слабым взаимодействиями и объединением их при сверхвысоких

энергиях следовало, что W -бозон и гамма-квант — это разновидности одной частицы и что у фотона должен быть тяжелый нейтральный аналог — промежуточный, как его называли, зет-бозон (Z -бозон).

Если признать, что нейтральный промежуточный бозон — реальность, то это будет одновременно и признанием реальности процессов рассеяния нейтрино на нуклоне или электроны без передачи электрического заряда. В природе должны существовать нейтральные токи! Не правда ли, что такое сочетание слов звучит так же непривычно, как, например, «горячий лед»? Тем не менее теория настаивает на реальном смысле этого словосочетания. В рассеянии, управляемом нейтральным током, нейтрино просто изменит направление движения и энергию, не превращаясь в заряженный лептон. Это было новое качественное предсказание процесса, до тех пор не наблюдавшегося в экспериментах.

В 1967 году С. Вайнберг из Гарвардского университета (США) и независимо А. Салам рассчитали вероятность процессов с нейтральными токами при передаче Z -бозона. Согласно этим расчетам в опытах по рассеянию нейтрино в жидководородных камерах должны обнаруживаться интересные события.

Подтверждение не заставило себя ждать. В 1973 году в ЦЕРНе экспериментаторам удалось наблюдать случаи упругого рассеяния нейтрино на протоне, а несколько позднее — и рассеяние нейтрино на электроны. Опыты проводились на нейтринном пучке с использованием пузырьковой камеры «Гаргамель». Это был большой успех теории единого электромагнитного и слабого взаимодействий. Салам назвал их одним термином «электро-слабое взаимодействие».

Любопытно отметить, что вероятность открытых реакций оказалась не намного меньше, чем других случаев рассеяния нейтрино с передачей заряженного W -бозона, — всего в несколько раз. Однако новый тип процессов сумели обнаружить только после их теоретического предсказания. По-видимому, сказывалось неверие в возможность существования упругого рассеяния нейтрино, пока не появились веские теоретические доводы.

За разработку объединенной теории электромагнитных и слабых сил в природе Глэшоу, Саламу и Вайнбергу в 1979 году была присуждена Нобелевская премия.

Когда вручали им награду, один из видных физиков

пошутил: «А если не найдут Z-бозон, то вернут ли они назад премию?» Шутка несколько не поколебала теорию, которая была принята физиками как прямое указание на характер и направление поисков. Экспериментаторы ЦЕРНа начали срочно перестраивать свой суперсинхротрон для организации встречных протон-антипротонных пучков, в которых могла быть реализована энергия, достаточная для рождения промежуточных бозонов. Теория Салама — Вайнберга давала для бозонов значения массы 80—90 гигаэлектронвольт, что в 100 раз превосходит массу протона. Это значит, что для рождения бозонов относительная энергия сталкивающихся частиц должна составлять сотни гигаэлектронвольт. На крупнейшем суперсинхротроне ЦЕРНа не удавалось получать такие тяжелые частицы. В нем пучок ускорялся до энергии в 400 гигаэлектронвольт и направлял на мишень. При таком соударении основная часть энергии налетающей частицы идет на кинетическую энергию продуктов реакции, а не на разрушение нуклонов и рождение новых частиц. Только при соударении встречных пучков, когда, как уже говорилось, суммарный импульс их нулевой, большая часть энергии, согласно соотношению $E=mc^2$, идет на рождение частиц.

Ученым ЦЕРНа пришла идея вместо строительства новых накопительных колец для протон-антипротонных соударений превратить суперсинхротрон в устройство со сталкивающимися пучками протонов и антипротонов. С этой целью предполагалось запустить пучок антипротонов в ту же вакуумную камеру, в которой ускорялся пучок протонов. Антипротоны должны были двигаться по орбите в направлении, противоположном движению протонов. К 1981 году перестройка суперсинхротрона была завершена.

В первой серии измерений в конце 1982 года нашли 6 событий, которые можно было истолковать как распад заряженных W^+ -бозонов. В измерениях в апреле и осенью 1983 года обнаружили уже около сотни случаев распада W^+ -бозонов и десятков с рождением Z-бозона. В последнем случае регистрировались два заряженных лептона (с противоположными знаками заряда) от распада Z-бозона. Эти лептоны разлетались в противоположные стороны с большой энергией. Релятивистская масса пары лептонов составила 95 гигаэлектронвольт, что оказалось близким теоретически предсказанной массе Z-бозона. Масса W^-

бозонов равна 80 гигаэлектронвольтам в точном соответствии с теорией электрослабого взаимодействия.

К этому остается добавить, что теория будет логически завершенной, если, помимо промежуточного бозона, допустить существование тяжелого бозона H, массу которого теория пока не может оценить. Однако весьма возможно, что она составит и 1000 гигаэлектронвольт — бозон окажется тяжелее любого ядра! Если H-бозон найдут, то можно будет считать доказанным, что промежуточный Z-бозон и гамма-квант — это разные состояния одной и той же частицы. Физики нацеливаются на подготовку экспериментов по поиску H-бозона. Для этого нужны еще более мощные ускорители и новые установки со встречными пучками частиц.

ГЛАВА 8. СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Чисто логическое мышление не может дать нам никакого знания эмпирического мира; все наши сведения о нем начинаются с эксперимента и кончаются им.

А. Эйнштейн

Резонансные состояния частиц

Физические представления о сильном взаимодействии между частицами создаются и непрерывно изменяются уже полвека. Сильное взаимодействие управляет межнуклонными силами в ядре и реакциями, протекающими с большой вероятностью.

До начала 50-х годов господствовала выдвинутая Юкавой точка зрения на механизм такого взаимодействия: оно осуществляется посредством обмена пионами между нуклонами. Нейтрон и протон Юкава рассматривал вместе с «шубой» из ненаблюдаемых (виртуальных) пионов; размеры нуклона и радиус взаимодействия пионного «облака» с нуклоном сравнимы с длиной волны порядка ферми (напомним, что это десятитриллионная часть сантиметра).

Сомнения в простоте картины сильного взаимодействия появились после открытия новых типов адронов, в первую очередь каонов и гиперонов. Принцип обменного характера взаимодействия распространили и на них: гипероны и нуклоны непрерывно испускают и поглощают каоны и пионы, взаимно переходя друг в друга. Затем

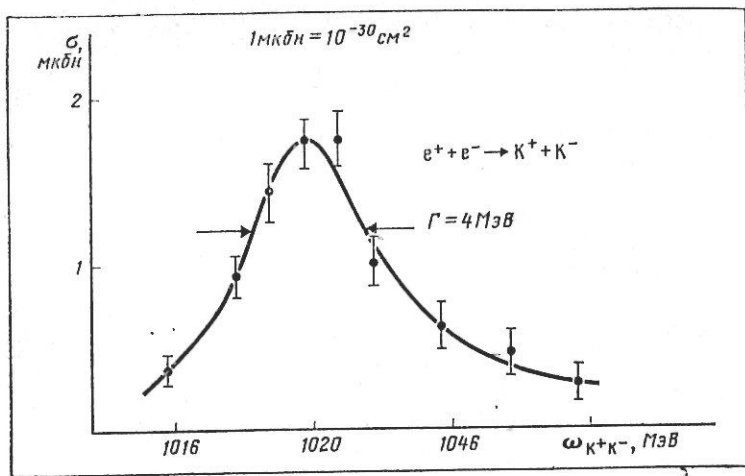


Рис. 19. Пример резонансной кривой: вероятность реакции $e^+ + e^- \rightarrow K^+ + K^-$ имеет максимум при массе двух частиц 1,02 гигаэлектронвольта, соответствующей образованию ϕ -мезонного резонанса. Эта экспериментальная кривая получена на встречных пучках в Новосибирске.

последовало открытие короткоживущих элементарных частиц с временами жизни порядка ядерных: 10^{-23} секунды. В 1951 году была открыта такая частица, которую можно трактовать как возбужденное состояние нуклона. Эту частицу называют дельта-1236 и обозначают греческой буквой Δ (1236). Число в скобках — это масса частицы в мегаэлектронвольтах. Так появилась первая из сотни открытых позднее короткоживущих частиц, называемых резонансами.

Почему им дано такое название?

Рассмотрим реакцию с рождением некоей частицы X с массой M_x , живущей минимальное по ядерному масштабу время, а затем распадающейся на две новые частицы, которые обозначим через α и β . Время жизни частицы X так мало, что приборы не могут ее зарегистрировать. Точнее говоря, она за свою короткую жизнь проходит столь малое расстояние, которое никакими современными методами измерить нельзя. Самый короткий след, какой ныне физики могут увидеть, оставляет частица, живущая не менее десятиллионной доли секунды. В опыте регистрируют только частицы α и β , но узнать о том, что они образовались в результате распада

частицы X , можно. Для этого измеряют энергии и импульсы этих частиц и рассчитывают их релятивистскую массу, пользуясь соотношением теории относительности. Если частицы α и β являются продуктами распада частицы X с массой M_x , то вероятность их рождения как функция релятивистской массы будет иметь максимум при значении массы, равном M_x . В противном случае такого максимума не будет. Кривая с максимумом называется резонансной кривой. Отсюда и название для короткоживущих частиц — резонансы. Например, вероятность реакции $e^+ + e^- \rightarrow K^+ + K^-$ имеет максимум при массе системы двух частиц, равной 1,02 гигаэлектронвольта. Наблюдаемый резонанс называют ϕ -мезонным резонансом и обозначают греческой буквой ϕ . Кривая приведена на рис. 19. Она получена в опытах на встречных пучках в Новосибирске.

Согласно соотношению неопределенностей время жизни частицы и неопределенность в ее массе — величины обратные. Времени жизни, равному 10^{-23} секунды, отвечает неопределенность в массе, равная 100 мегаэлектронвольтам. Это и есть ширина максимума на резонансной кривой. На рис. 19 она обозначена буквой « Γ ».

Физический смысл образования резонанса состоит в том, что в процессе соударения частиц возникает возбужденное состояние частицы или системы частиц. Это состояние неустойчиво: возбужденные частицы распадаются в систему частиц, имеющих в сумме меньшую массу.

Кроме малого времени жизни, резонансы ничем не отличаются от других частиц. Поэтому их также относят к элементарным частицам.

Открытие первого резонанса обычно связывают с опытами Ферми 1951 года, когда он со своими сотрудниками изучал рассеяние π -мезонов на протонах. Однако можно смело утверждать, что открытие резонансов имеет более давнюю историю, а честь открытия в не меньшей степени принадлежит ряду теоретиков разных стран.

В конце 30-х годов в зарождающейся физике элементарных частиц создалась сложная ситуация. С одной стороны, уже появились релятивистская квантовая механика и теория поля, объяснявшие качественные и некоторые количественные стороны поведения частиц. Но,

с другой стороны, теория имела в ряде утверждений серьезные противоречия. Расчеты только в низшем приближении согласовывались с экспериментальными данными и давали разумные результаты, а в высших приближениях приводили к бесконечным, расходящимся выражениям, не имевшим физического смысла. Для устранения этого противоречия уже упоминавшийся нами индийский физик Х. Баба в апреле 1940 года в «Докладах Академии наук Индии» высказал гипотезу о существовании у нуклона нескольких состояний с положительным и отрицательным зарядом, кратным заряду электрона, а нейтрон и протон он рассматривал как низшие энергетические состояния нуклона, устойчивые относительно распадов. А в мае 1940 года В. Гайтлер направил статью в «Доклады Королевского общества» Великобритании, в ноябре того же года она была опубликована. В этой статье Гайтлер развил гипотезу Баба. Он предположил, что не только заряд, но и спин нуклонов может принимать более высокие значения, чем у нейтрона, а именно $3/2$, $5/2$. Доказывалось, что энергия возбуждения нуклона должна составлять десятки мегаэлектронвольт.

Баба советовал искать высокоэнергетические состояния нуклонов в экспериментах по рассеянию протонов или мезонов на протонах с энергиями выше 50 мегаэлектронвольт.

В 1942 году Паули развил гипотезу Баба и Гайтлера. Он доказал, что первое возбужденное состояние нуклона должно иметь спин $3/2$ и 4 состояния с разным электрическим зарядом. Этот возбужденный нуклон Паули назвал изобарой нуклона.

В 1946 году в США и в 1948 году в СССР были построены первые ускорители протонов релятивистских энергий — синхроциклотроны, на которых начали проводить опыты по рассеянию высокоэнергетических частиц на мишенях.

В октябре 1951 года на собрании Чикагского физического общества было сделано сообщение об измерении вероятности рассеяния пионов с энергией от 60 до 230 мегаэлектронвольт на водороде. Опыты были проведены в лаборатории Ферми.

Первоначально на синхроциклотроне Чикагского университета получали протоны, ускоряемые до максимальной энергии 460 мегаэлектронвольт. Затем протоны на-

правлялись на бериллжевую мишень. В результате соударения протонов с ядрами бериллия рождались пионы до 10 миллиардов за секунду. Пионы отклонялись магнитным полем, причем только отрицательно заряженные пионы заворачивались в нужную сторону и направлялись в камеру с жидким водородом. Ядра водорода бомбардировались пионами с энергией до 230 мегаэлектронвольт. Регистрировались пионы, отклонившиеся под разными углами в результате рассеяния. Изучалась зависимость числа рассеянных пионов от угла вылета и энергии начального пиона. Оказалось, что это возрастающая функция в области от 100 до 230 мегаэлектронвольт. В этом интервале вероятность процесса рассеяния увеличивается в три раза.

С начала 50-х годов стали проводиться международные конференции по физике элементарных частиц, названные Рочестерскими — в честь первого организатора конференции университета города Рочестера (США). В январе 1952 года на второй Рочестерской конференции Г. Андерсон сделал сообщение о результатах рассеяния уже положительно заряженных пионов на водороде. Вероятность рассеяния оказалась в 4 раза больше, чем для отрицательно заряженного пиона, и росла вплоть до энергии 230 мегаэлектронвольт — наивысшей достигнутой тогда энергии.

Анализируя ход кривых вероятностей рассеяния пионов обоих знаков заряда на протоне, американский теоретик К. Бракнер на основе теории Паули объяснил соотношение этих вероятностей и их рост. Бракнер утверждал, что вероятность как функция энергии будет иметь резонансный вид. Это подтвердилось в опытах последующих двух лет.

Итак, первую открытую резонансную частицу — возбужденный нуклон — назвали резонансом Δ (1236). Наблюдаются 4 зарядовых состояния этого резонанса, обозначаемые буквами Δ^- , Δ^0 , Δ^+ , Δ^{++} . Последнее из них имеет двойной электрический заряд протона. Энергия возбуждения нуклона оказалась равной 300 мегаэлектронвольтам. То, что значение энергии возбуждения нуклона отличается от предсказанного Гайтлером — десятки мегаэлектронвольт вместо сотен мегаэлектронвольт, — объясняется тем, что во время предсказания пионы еще не были открыты и постоянная их взаимодействия с нуклоном бралась существенно меньшей —

из взаимодействия мюонов с протонами (тогда мюон принимали, как говорилось в начале книги, за предсказанный Юкавой сильно взаимодействующий мезон, названный позднее пионом).

Глобальная симметрия и гиперонные резонансы

В 1957 году теоретик из Калифорнийского технологического института М. Гелл-Ман выдвинул концепцию глобальной симметрии, согласно которой все барионы (p , n , Λ , Σ , Ξ) представляют собой разные состояния одной частицы. Взаимодействие пионов с барионами должно было быть аналогичным взаимодействию пиона с протоном. Поскольку резонанс Δ (1236) уже был известен, то Гелл-Ман предсказывал существование также резонанса во взаимодействии пиона с Λ -гипероном, и с Σ -гипероном.

Это предсказание побудило группу экспериментаторов в Лоуренсовской радиационной лаборатории Калифорнийского университета начать опыты по поиску резонансных состояний частиц, распадающихся на пион и гиперон. Решающий эксперимент выполнили американские физики М. Алстон и Л. Альварец летом 1960 года.

Пучок K^- -мезонов с энергией 1 гигаэлектронвольт направлялся в 15-дюймовую пузырьковую камеру. Следы частиц фотографировались. На снимках наблюдали большое число событий: трехлучевые звезды, отвечающие упругому рассеянию мезонов на протонах, многолучевые звезды, свидетельствующие о процессах с рождением гиперонов и пионов. Из звезд отбирались только такие, которые говорили о событиях типа $K^- + p \rightarrow \Lambda + \pi^+ + \pi^-$.

Эта реакция была выбрана потому, что она идет с большой вероятностью и ее легко установить по наличию на фотографиях двухлучевых V -образных событий, отвечающих распаду Λ -гиперона.

Исследователи просмотрели несколько десятков тысяч фотографий. Это были первые снимки с пузырьковой камеры, использованной в опыте. На 255 фотографиях нашли интересующие случаи реакции. Распределение событий по релятивистской массе пары частиц — пион плюс Λ -гиперон — имело резонансный вид с максимумом при 1385 мегаэлектронвольтах. Впервые об этом резонансе, названном сигма-1385 — Σ (1385), научный мир узнал на десятой Рочестерской конференции.

Характер взаимодействия				Сильное	Слабое	Эл-е												
Сильное	Мезонн.	Время жизни, с																
10^{-23} 10^{-22}	10^{-14} 10^{-10} 10^{-8}	10^{-23} 10^{-22} 10^{-21} 10^{-20} 10^{-19} 10^{-16} 10^{-15} 10^{-10} 10^{-8} ∞	∞ ∞ ∞ ∞ ∞ μ e ν γ	0	1	2	3	4	5	10								
Область резонансов $N^* \Lambda^* \Sigma^* \Xi^*$	Σ^0 $\Lambda \Sigma^\pm \Xi \Omega^-$ π p	Область резонансов $\rho \omega \kappa \phi f D E g \chi \psi h r$	η κ^0 κ^\pm K_5 K_2		τ				$D F$	$\psi_3 \psi_4$ $\chi_1 \chi_2$ ψ_2 η_c J/ψ	$\gamma^1 \gamma^2$ γ							
		$\Lambda_c \Sigma_c$																Масса $\times c^2$, ГэВ

В следующем году в Лоуренсовской лаборатории на той же экспериментальной установке были исследованы реакции с рождением Σ -гиперонов. Оказалось, что в этих реакциях нейтральные пары частиц — пион плюс противоположно заряженный гиперон — рождались в результате распада резонанса с массой 1404 мегаэлектронвольта, названного Δ (1404)-резонансом.

Таким образом, идея глобальной симметрии подтвердилась открытием первых гиперонных резонансов.

Структура нуклона и первые мезонные резонансы

Другое направление теоретических и экспериментальных исследований в те же годы привело к открытию резонансов в системах из двух и трех пионов.

Началось все с открытия у нуклона структуры в опытах по бомбардировке водородной мишени ускоренными электронами.

Строение нуклона изучалось с 1953 года таким же методом, каким Резерфорд изучал строение атома. Резерфорд «обстреливал» мишень из золотой фольги альфа-частицами. Если в атоме заряд был бы распределен однородно по всему объему, то альфа-частицы рассеивались бы достаточно симметрично относительно направления движения. Однако Резерфорд наблюдал иную картину: почти все альфа-частицы пролетали пространством атома так, будто оно было пустое, то есть практически не меняли направления движения. Но какие-то явно натывались на что-то и отскакивали от этого препятствия под разными углами. Это могло происходить только в том случае, если атом состоит из пустого пространства с маленьким тяжелым положительно заряженным ядром. Именно поэтому почти все альфа-частицы проходили сквозь атомы не отклоняясь, кроме тех, которые сталкивались с самим ядром. Измеренное угловое распределение рассеянных альфа-частиц совпадало с рассчитанным для кулоновского поля точечного ядра. Так в опытах Резерфорда было открыто атомное ядро.

Аналогично и структуру нуклона можно изучать, облучая водородную мишень быстрыми частицами и исследуя рассеяние в зависимости от угла и начальной энергии. В качестве зондирующих частиц наиболее подходящими оказываются электроны, так как между ними и нуклонами действуют только электромагнитные силы. Законы электромагнитного взаимодействия хорошо из-

вестны, поэтому из данных по рассеянию можно сделать вывод о структуре ядра мишени.

Первые опыты по изучению рассеяния электронов на нуклонах были поставлены в Стэнфорде (США). Электроны имели энергию до 550 мегаэлектронвольт. Это самая высокая «энергетическая точка», на которую можно было в то время «поднять» электроны. Обладая такой энергией, они могут проникать в глубь атома на расстояние в десятые доли ферми. Поэтому электрон «не чувствует» электронной оболочки атома, которая имеет в тысячу раз больший размер, и рассеивается именно на нуклонах атомов водородной мишени (использовался как легкий, так и тяжелый изотоп водорода — дейтерий).

Первые же результаты опытов поразили физиков.

Во-первых, размеры ядер и нуклонов оказались на 20 процентов меньше вычисленных ранее. Для нуклона, например, вместо 1,5 ферми (точнее, чуть меньше 1,5 ферми) опыты дали 1,2 ферми.

Во-вторых, опыты с электронами не подтверждали предположения о наличии электрического заряда внутри нейтрона. Согласно представлению о существовании у нейтрона «шубы» из виртуальных пионов, в том числе отрицательно заряженных, проникающие в «шубу» электроны должны были «почувствовать» распределение электрического заряда в ней. Но этого не произошло. Более того, заряд внутри нейтрона оказывался равным нулю. В то же время именно наличие движения отрицательно заряженных пионов в нейтральной «шубе» и позволяет рассчитать и объяснить его магнитный момент, противоположный по знаку протонному магнитному моменту и лишь несколько меньший его по величине.

В-третьих, распределение электронов, рассеянных на нуклонах под большими углами (что возможно только при глубоком проникновении их в нуклон), сильно отличалось от углового распределения в случае рассеяния электронов на точечной частице.

Как же физики истолковали результаты этих опытов?

Все три основных факта можно было объяснить тем, что в пионной «шубе» нуклонов существуют системы из сильно взаимодействующих двух и трех пионов. Этим состояниям приписываются спин, равный единице, и масса около 800 мегаэлектронвольт. Их называют ро- и омега-мезонами (ρ - и ω -мезоны). По этой теории «шу-

ба» пионов вокруг нуклона считается многослойной. Внешний слой составляют одиночные пионы. Они определяют радиус нуклона в ядрах. Второй слой образуют тяжелые группы мезонных образований. Их большей массе отвечает меньшая длина волны — это сердцевина нуклона.

Наличие спина, равного единице, у ρ - и ω -мезонов позволяет им легко переходить в фотон, также имеющий спин 1. Поэтому влияние тяжелых мезонов сказывается в электромагнитных взаимодействиях адронов.

Теоретические предсказания существования тяжелых мезонов оказалось несложно проверить в опытах по рассеянию быстрых пионов и антипротонов на водороде. В 1961 году в Беркли (США) в опытах по бомбардировке водорода пузырьковой камеры быстрыми частицами открыли резонансы с предсказанными свойствами для ρ - и ω -мезонов.

Последующие опыты по рассеянию электронов более высоких энергий потребовали для своего объяснения предположения о существовании еще ϕ -мезона (ϕ -мезона), вскоре также открытого в рассеянии адронов.

Теперь важно было убедиться в том, что адроны ϕ и ω , проявляющиеся в рассеянии электронов, действительно участвуют в электромагнитном взаимодействии. И это было доказано в опытах начала 60-х годов физиками ОИЯИ и ИТЭФа, открывшими электромагнитные типы распадов ϕ - и ω -мезонов. Об этих экспериментах мы уже рассказывали.

В течение последующего десятилетия экспериментаторы нашли добрую сотню новых резонансов.

В поиске резонансов активно участвовали советские физики. В 1964 году на 12-й Международной конференции по физике элементарных частиц они сообщили об открытии мезонного резонанса с массой 1030 мегаэлектронвольт.

В июне 1975 года в экспериментах на ускорителе в Серпухове группа физиков из ИФВЭ и ЦЕРНа под руководством Ю. Д. Прокошкина открыла h -мезон с массой 2 гигаэлектронвольта, а в 1983 году — g -мезон с массой 2,5 гигаэлектронвольта. Эти мезоны были открыты в ходе изучения так называемых зарядово-обменных реакций, в результате которых падающие на протонную мишень быстрые π^- -мезоны превращаются в нейтральные π^0 -мезоны. На протяжении нескольких лет было за-

регистровано свыше 10 миллионов событий по пион-протонным соударениям. Бомбардирующие пионы имели энергию 40 гигаэлектронвольт.

Рождающиеся в реакции нейтральные пионы живут малое время — 10^{-16} секунды, их не удастся непосредственно зарегистрировать. Но детекторы улавливают два гамма-кванта, на которые распадается каждый π^0 -мезон. Удалось измерить их энергию и импульс, а затем рассчитать релятивистскую массу системы из первоначальных нейтральных пионов — «родителей» гамма-квантов.

В этом опыте ученые обнаружили нейтральные пионы как от распада известного ранее резонанса f -мезона с массой 1254 мегаэлектронвольта, так и от распада новых резонансов h - и g -мезонов, живущих 10^{-23} секунды. Измерения показали, что спин h -мезона равен 4, а g -мезона — 6.

Открытие h - и g -мезонов подтверждает важную закономерность о примерной пропорциональности квадратов массы мезонов величине их спинов. Это соотношение выполняется для ряда, составленного из мезонов: ρ (780), f (1254), g (1680), а также новых h - и g -мезонов.

Простейшая классификация сильновзаимодействующих частиц

Итак, изобретение пузырьковой камеры привело к открытию в начале 60-х годов целого сонма новых частиц — резонансов. Ныне их известно свыше ста. Возникла потребность в объяснении спектра масс элементарных частиц. Ситуация в физике напоминала в некотором роде положение, сложившееся в ботанике в XVIII веке, когда требовалось классифицировать все растения. Физикам был нужен свой Карл Линней.

Наибольших успехов достиг здесь к началу 60-х годов М. Гелл-Ман. Его классификация играет ту же роль, что и таблица Менделеева для химических элементов.

Гелл-Ман и независимо от него японский физик К. Нишиджима разбили все множество сильновзаимодействующих частиц (адронов) на семейства, называемые зарядовыми мультиплетами. Члены одного мультиплета имеют близкую массу (различающуюся только на несколько мегаэлектронвольт), одинаковую странность, но разный электрический заряд. Так, известные к 1954 году Σ^+ - и Σ^- -гипероны с массами 1190 и 1197 мега-

электронвольт были объединены в один мультиплет, а сильно отличающийся от них по массе нейтральный Λ^0 -гиперон с массой 1115 мегаэлектронвольт был отнесен к другому семейству. Предсказывалось, что у Σ^+ - и Σ^- -гиперонов есть нейтральный родственник Σ^0 -гиперон, который и был вскоре открыт. Масса Σ^0 -гиперона оказалась равной 1192 мегаэлектронвольтам.

В 50-х годах было известно три K -мезона: K^+ , K^- и K^0 . Казалось, что они составляют одно семейство. Однако это противоречило закону сохранения квантовых чисел в реакции



которая неоднократно наблюдалась. Но законы сохранения выполнялись, если K^+ - и K^0 -мезоны относились к одному мультиплету, а K^- -мезон — к другому. У K^- -мезона в этом случае должен быть еще родственник — анти- K -нуль-мезон (\bar{K}^0). Вскоре этот теоретически предсказанный нейтральный анти- K -мезон был открыт.

Суперсемейства адронов и предсказание новых частиц

В атомной физике считается, что состояние атома до помещения его в магнитное поле является вырожденным. Это означает, что у атома есть несколько состояний, различающихся квантовыми числами, но имеющих одну и ту же энергию. Однако потенциальная энергия атома в магнитном поле зависит от них. Поэтому в магнитном поле происходит, как говорят физики, снятие вырождения атома: атомы с разными квантовыми числами приобретают и разные энергии.

Физика элементарных частиц взяла это положение атомной физики себе на вооружение. По аналогии нуклон — это вырожденное состояние, и вырождение снимается электромагнитным взаимодействием: нуклон приобретает два значения массы, соответствующие нейтрону и протону, — 939,5 и 938,3 мегаэлектронвольта. Та же причина снимает вырождение и у других членов мультиплетов. При этом массы у частиц одного мультиплета начинают различаться на несколько мегаэлектронвольт.

Гелл-Ман пошел еще дальше. Он, как мы уже упоминали, выдвинул гипотезу о том, что основные состояния барионов — нейтрон, протон и гипероны — это также различные состояния одной частицы и все вместе они составляют один супермультиплет. Дополнительным

основанием для такого предположения было то, что обнаружилось на опыте примерное равенство вероятностей реакций барионов с пионами и каонами. Причем взаимодействие с пионами можно было рассматривать как сильное, а с каонами — как умеренно сильное. Последнее и снимает вырождение в супермультиплете.

Важным моментом в этой идее (ее называют идеей унитарной симметрии) является требование того, чтобы все барионы супермультиплета имели одно значение спина $1/2$.

До 1961 года — года, когда была выдвинута идея унитарной симметрии, — считалось, что у Σ -гиперона спин равен $3/2$. В пользу этого значения свидетельствовал как будто бы и эксперимент. Однако из симметрии следовало другое значение спина у Σ -гиперона: он должен быть равен $1/2$. И вскоре тщательно поставленный опыт это подтвердил.

Было известно также, что нуклон имеет возбужденное состояние Δ с массой 1236 мегаэлектронвольт. Согласно идее унитарной симметрии и у гиперонов должно быть возбужденное состояние с тем же спином $3/2$. И это подтвердилось опытным путем, что в немалой степени способствовало признанию унитарной симметрии.

Для объяснения унитарной симметрии ученые допускают, что все адроны составлены из гипотетических объектов 3 типов в разных комбинациях. Отсюда и вытекает схожесть свойств адронов. Такая симметрия приводит к разделению всего множества адронов на семейства, состоящие из 1, 3, 8, 10, 27 и большего числа частиц. Так, известные физикам долгоживущие гипероны и нуклоны составляют семейство из 8 (октет) частиц (p , n , Λ , Σ^+ , Σ^- , Σ^0 , Ξ^- , Ξ^0).

Следуя этому рассуждению, можно утверждать, что семейство мезонов (π , K) также должно составлять октет частиц с нулевым спином. Но всего было известно только 7 таких частиц — это π^+ , π^0 , π^- , K^+ , K^- , \bar{K}^0 , K^0 . Где же 8-й член октета? Гелл-Ман предсказал его существование, и уже в 1961 году он был открыт, его назвали эта-мезоном (η -мезон). Спин у эта-мезона — 0.

Были известны 4 возбужденных состояния нуклона, 3 возбужденных состояния Σ -гиперонов, 2 резонансных состояния Σ -гиперона, то есть всего 9 возбужденных состояний барионов. У них у всех спин равен $3/2$. Но в схе-

ме с 3 фундаментальными субчастицами «семья» должна состоять из 10 частиц. Не хватало одной частицы. Разница масс при переходе от легких частиц этого мультиплета к более тяжелым составляет 145 мегаэлектронвольт. Поэтому нетрудно было предсказать массу нового тяжелого гиперона. Она оценивалась в 1670 мегаэлектронвольт. Этот новый гиперон, названный омега-минус-гипероном (Ω^-), открыли в 1964 году американские физики У. Фаулер и Н. Сеймиос в опытах на протонном ускорителе Брукхэйвенской национальной лаборатории при бомбардировке K^- -мезонами жидководородной пузырьковой камеры.

Так было подтверждено важнейшее следствие классификации частиц по схеме унитарной симметрии.

Самое поразительное свойство новой частицы — ее большое время жизни — целых 10^{-10} секунды, тогда как остальные члены семейства распадаются за ядерное время — 10^{-23} секунды.

За классификацию частиц Гелл-Ману в 1969 году присуждена Нобелевская премия.

Несмотря на успешную классификацию адронов и предсказание η -мезона и Ω^- -гиперона, у теории унитарной симметрии были и свои нерешенные вопросы. Она не объясняла, да и до сих пор не объясняет, почему нет мультиплетов с 27 «родственниками». Не открыты самостоятельно существующие субчастицы, из которых состояются адроны. Правда, опыты последнего десятилетия, которые станут еще предметом нашего рассказа, свидетельствуют в пользу существования таких субчастиц в нуклоне.

Следует отметить, что составные модели адронов развивались и до схемы унитарной симметрии. Одна из них была предложена японским теоретиком С. Сакатой. Согласно его схеме все адроны составлялись из комбинаций 3 «самых» элементарных барионов: протона, нейтрона и лямбда-гиперона. Так, π^+ -мезон представлялся как система из антинейтрона и протона, странные мезоны составлялись из нуклона и анти-лямбда-гиперона и т. д. Независимость составных адронов относительно перестановки 3 фундаментальных барионов схемы Сака-ты приводила к образованию одного семейства из 8 мезонов и также позволяла предсказать η -мезон. Разработка этой модели была важным этапом в создании последующей составной модели Гелл-Мана. Следствия из

схемы Сака-ты для распадов частиц изучил советский теоретик Л. Б. Окунь.

Представляет интерес понятие свойства 3 фундаментальных субчастиц, опираясь на идею унитарной симметрии. Чтобы образовать целочисленные значения барионного и электрического зарядов адронов, 3 гипотетических объекта должны иметь дробные значения зарядов, 2 объекта имеют нулевую странность и электрические заряды $2/3$ и $(-1/3)$ в единицах заряда электрона, а третий — странность $S=-1$ и электрический заряд $(-1/3)$. Эти гипотетические объекты были введены одновременно и независимо в 1964 году двумя сотрудниками Калифорнийского технологического института М. Гелл-Маном и Г. Цвейгом и названы кварками. Их обозначают в настоящее время буквами u , d и s , образованными от начальных букв английских слов *up*, *down* и *strange*. Однако первоначальные обозначения кварков были такие же, как и в модели Сака-ты для барионов p , n и Λ .

Системе из 3 кварков соответствует и система из 3 антикварков. Все они имеют спин $1/2$. Протон рассматривается как система кварков uud , нейтрон — как udd . Квантовые числа определяются суммированием квантовых чисел кварков. Системе из 3 кварков u или d соответствует возбужденное состояние нуклона Δ^{++} или Δ^- . Гиперонам отвечают кварковые комбинации uds , uus , dds и т. д.

Любопытно, что предположение о существовании кварков объясняет тот необычный факт, что барион со странностью $S=-3$ (Ω^- -гиперон) имеет только одно зарядовое состояние — с отрицательным зарядом. Положительный заряд будет уже только у его античастицы, называемой анти-омега-плюс-гипероном ($\bar{\Omega}^+$ -гиперон). Однако барионный заряд у этой частицы — отрицательный. Нейтрального омега-гиперона в природе не существует. Действительно, согласно кварковой схеме система из 3 кварков имеет странность $S=-3$, как и у Ω^- -гиперона. Но при этом заряд частицы обязательно равен заряду электрона.

$\bar{\Omega}^+$ -гиперон представляет собой систему из 3 странных антикварков, а нейтральный барион со странностью $S=-3$ образовать из кварков нельзя.

Точно так же гиперон со странностью $S=-2$ имеет только 2 зарядовых состояния — с отрицательным зарядом и нейтральное: Ξ^- и Ξ^0 . Нет положи-

тельно заряженного кси-гиперона. Действительно, если мы возьмем 2 странных кварка s , в сумме имеющих электрический заряд $-2/3$, то добавлением одного нестранного кварка можем получить только заряд -1 или 0 .

Мезоны образуются из парных комбинаций — кварка и его антикварка.

Самое необычное свойство кварков — наличие у них дробного электрического заряда. Такие частицы никогда не наблюдали в природе. Именно эта их необычность и послужила поводом Гелл-Ману назвать их словом, которого нет в английском языке; оно — выдумка английского писателя Д. Джойса*.

Предполагалось, что кварки должны рождаться в ускорителях при столкновениях частиц высокой энергии. Однако поиски этих загадочных частиц не увенчались успехом.

Не найдя частиц с дробным электрическим зарядом в экспериментах на ускорителях, их стали искать в космических лучах. Не нашли и тут. Возможно, потому что плотность их числа очень мала и приборы не могут их зарегистрировать.

Так, может быть, под действием приходящих на Землю космических лучей кварки могли накопиться в земных условиях? Кварки искали в большом наборе веществ — воде, известняках, лаве, планктоне, устрицах, метеоритах. Все напрасно.

И экспериментаторы явно охладели к этим частицам с дробным зарядом. Однако теория уже не могла обходиться без них — кварки нужны были и для классификации частиц, и для нового витка в понимании строения вещества. Теоретики стали предпринимать попытки «узаконить» существование кварков и одновременно объяснить, почему их невозможно обнаружить. И вот в 1973 году удалось показать, что взаимодействие между кварками может иметь такой характер, при котором их раздельное существование невозможно, как невозможно, например, у магнита отделить один полюс от другого. Если магнит разделить, то каждый новый кусочек будет по-прежнему иметь оба полюса. Или другой пример: чем

* В романе Д. Джойса «Поминки по Финнегану» чайки-призраки (герою романа дублинскому трактирщику, возмнившему себя средневековым королем Марком, эти чайки-призраки кажутся судьями) кричат: «Три кварка для мистера Марка!»

больше вы хотите растянуть резиновый жгут, тем большие усилия вам приходится прикладывать. Но резина ведь может в конце концов порваться! Предположим, что аналогия с резиной верна; тогда естественно возникает вопрос: какую энергию надо сообщить системе, состоящей из кварков, чтобы она распалась на свои составляющие?

Кварк и эксперимент

С начала 70-х годов появились новые экспериментальные свидетельства в пользу существования кварков внутри протона. В Стэнфорде на электронном ускорителе с энергией ускоренных электронов 20 гигаэлектронвольт проводились опыты по упругому рассеянию электронов на нуклонах, когда электроны отклоняются под разными углами, и по неупругому рассеянию, когда доплнительно рождаются новые частицы.

О структуре нуклона судили по зависимости числа рассеянных электронов от угла рассеяния. Основа философии опытов по рассеянию электронов и других лептонов на нуклоне состоит в том, что свойства самих лептонов достаточно хорошо известны. Так, например, магнитный момент электрона рассчитывается в квантовой электродинамике с погрешностью всего в миллионную долю процента. В то же время магнитный момент нуклонов из-за отсутствия теории сильного взаимодействия с такой точностью рассчитать невозможно: здесь погрешность в расчете не меньше 10 процентов. Вот почему лептоны удобно использовать как «пробники» для исследования структур нейтрона и протона.

Важно также и то, что лептоны ведут себя как точечные частицы, по крайней мере при тех энергиях, которые ныне удается достичь и которые соответствуют размерам (длинам волн) в сотые доли ферми. В то же время размер нуклона — это 1,5 ферми. Ясно, что маленькие частички легко могут проникать в большую и тем самым помочь физикам понять структуру последней. В неупругом рассеянии на нуклоне распределение электронов по углу рассеяния слабо меняется, оно уменьшается всего в несколько раз, если импульс увеличивается на несколько гигаэлектронвольт. Это можно объяснить существованием в адроне точечных частиц, какими и могут оказаться кварки.

Электрон или нейтрино, попав прямо в такую точеч-

ную частицу, то есть в кварк (если он, конечно, существует!), должны выбить ее из нуклона. Выбитый из нуклона кварк тут же должен «надеть» на себя «одежду» из виртуальных кварк-антикварковых пар и предстать уже в образе обычного адрона.

Рассеяние электронов на адронах под малыми углами обусловлено распределением электрического заряда в адронах, а рассеяние назад — распределением магнитного момента в них. Отношение вероятностей неупругого рассеяния под большими и малыми углами позволяет определить величину магнитного момента точечной подструктуры в нуклоне, а значит, и пропорциональный ему спин. Эксперимент показал, что точечный объект внутри нуклона имеет спин $1/2$ в соответствии с теоретической моделью кварков.

Вероятность рассеяния нейтрино на нуклоне определяется распределением массы внутри нуклона, а вероятность рассеяния электрона — еще и распределением заряда. Отношение вероятностей этих двух процессов должно быть равно среднему квадрату электрического заряда субчастиц в адроне. Если мишенью служат ядра дейтерия, содержащие равное число протонов и нейтронов, а значит, и кварков типа u и d , то средний квадрат заряда равен половине суммы квадратов зарядов u - и d -кварков, то есть $5/18$. Такое отношение и было получено в эксперименте. Трудно представить, чтобы столь необычное число, как $5/18$, возникло в эксперименте случайно. Поэтому можно считать, что и нейтрино, и электрон «видят» одинаковую внутреннюю структуру в нуклоне, а составляющие его субчастицы имеют дробный заряд $2/3$ и $-1/3$.

Еще одно косвенное свидетельство в пользу существования кварков в адронах дают столкновения между собой самих адронов.

Коль скоро допускается, что адроны представляют собой «рыхлые» составные системы, то естественно думать, что при столкновениях взаимодействуют элементы их структуры — те же кварки. Как уже было сказано, теория «помещает» в нуклон 3 кварка, а в мезон — по одному кварку и антикварку. Стало быть, при столкновении двух нуклонов может произойти 9 (3×3) кварк-кварковых соударений, при столкновении антипротона с протоном — также 9 соударений, но уже кварк-антикварковых, а при столкновении мезона с нуклоном —

3 кварк-кварковых и 3 кварк-антикварковых соударения. С помощью простой арифметики легко убедиться потому, что вероятность столкновения мезона с нуклоном будет в 3 раза меньше суммы вероятностей столкновения двух нуклонов и нуклона с антинуклоном. Опыт это подтверждает с погрешностью всего в 15 процентов.

В 1973 году советские физики В. А. Матвеев, Р. М. Мурадян и А. Н. Тавхелидзе вывели формулу для зависимости от энергии вероятности рассеяния на большие углы. Согласно этой формуле вероятность оказывается обратно пропорциональной энергии в степени, которая является суммой чисел кварков и антикварков рассеиваемых частиц. Эта формула носит название формулы кваркового счета. Она устанавливает зависимость между быстротой убывания вероятностей с ростом энергии и степенью сложности участвующих в реакции частиц.

Развитие кварковой модели.

Цветные кварки

Развитие кварковой модели упиралось в одну принципиальную трудность. Согласно этой модели Ω^- -гиперон должен состоять из 3 странных кварков одного типа, а Δ^{++} -резонанс — из 3 нестранных кварков u . Но в квантовой механике действует принцип Паули, который запрещает частицам со спином $1/2$ находиться в физической системе в одном и том же состоянии.

Чтобы преодолеть противоречие между принципом Паули и первоначальной кварковой схемой, понадобилось усложнить кварковую модель. В 1965 году советские теоретики Н. Н. Боголюбов, Б. В. Струминский, А. Н. Тавхелидзе и независимо от них американские теоретики О. Гринберг, М. Хан и японский И. Намбу выдвинули идею о том, что у кварков есть еще одно квантовое число, новый тип заряда, названный цветом. Им-то и различаются кварки в Ω^- -гипероне или Δ^{++} -резонансе. Конечно, здесь цвет — это условное обозначение, которое не следует путать с его обычным значением.

Кваркам приписывается один из трех цветов, названных условно красным, синим, зеленым. Антикваркам приписываются антицвета. Все адроны состояются из кварков разных цветов так, чтобы образовывались «бесцветные» комбинации, ведь у адронов нет квантового числа, именуемого цветом.

Роль цвета сопоставима с ролью электрического заряда в электродинамике. Как и электрический заряд, он определяет силу и характер взаимодействия, но взаимодействия специфического — на уровне кварков. Кварковая модель исходит из того, что переносчиками взаимодействия между кварками выступают глюоны — такие же пока гипотетические частицы, как и сами кварки (глюон — от английского *glue* — «склеивать»). Для 9 возможных комбинаций взаимодействия цветных кварков теория предназначает 8 разных глюонов. Глюоны по теории не обладают ни электрическим, ни барионным зарядами, зато имеют сразу и цвет, и антицвет другому цвету. При испускании глюона кварком уносится цвет кварка, но передается кварку новый цвет от глюона.

Теория взаимодействия цветных кварков и глюонов получила по аналогии с квантовой электродинамикой название хромодинамики, то есть динамики частиц с цветом.

В электродинамике электрический заряд, определяющий силу взаимодействия, — одно число, а выступающий в хромодинамике в роли заряда цвет — это уже 3 числа. Поэтому построение хромодинамики оказалось делом несравненно более сложным, чем электродинамики.

С точки зрения хромодинамики, адрон подобен атому: кварки «склеиваются» глюонами аналогично тому, как в атоме ядро и электроны связываются между собой фотонами. В ядре атома действуют электрические силы, называемые силами Ван-дер-Ваальса (по имени нидерландского физика). Эти силы заставляют атомы сливаться в молекулы. Возможно, по такой же схеме и кварки взаимодействуют между собой. Иными словами, роль ван-дер-ваальсовых сил вне адронов выполняют «остатки» цветового взаимодействия кварков, а мы воспринимаем это как проявление сильного взаимодействия между адронами.

Основанием для такого предположения служит тот факт, что и для ван-дер-ваальсовых сил, и для сильного взаимодействия характерно очень быстрое ослабление интенсивности, когда между взаимодействующими «объектами» растет расстояние.

Эксперименты на пересекающихся накопительных протон-антипротонных кольцах в ЦЕРНе, электрон-позитронных пучках в Гамбурге дали в конце 70-х — нача-

ле 80-х годов новые подтверждения о существовании у адронов подструктур.

Соударения частиц приводят изредка к случаям вылета двух струй адронов под большими углами к оси пучков. Эти результаты рассматриваются как доказательство вылета в противоположные стороны двух кварков в «одевании» из виртуальных кварков, антикварков и глюонов, то есть в виде обычных адронов, как мы уже об этом говорили.

Однако в этом истолковании есть одно «темное пятно». Неясно, каким все-таки образом кварки превращаются в расходящиеся струи (пучки) адронов. То есть когда и как «голые» кварки и антикварки, вылетая из адронов, «одеваются» другими кварками, антикварками и глюонами, перед тем как попасть в детекторы?

Довольно просто истолковываются результаты лобового соударения частиц во встречных пучках для случая электрон-позитронных взаимодействий. Когда сталкиваются друг с другом электрон и позитрон, рождается виртуальный фотон высокой энергии, который мгновенно распадается на разлетающиеся в противоположных направлениях реальные частицы. Обычно это снова электрон и позитрон или мюоны. В существовании такого процесса уже никто не сомневается. Однако если энергия первичных ускоренных частиц велика, распад виртуального фотона может происходить и по-другому — на кварк и антикварк. Возможно, их и наблюдают в виде разлетающихся в противоположные стороны струй. Обычно в такой струе обнаруживают до десятка пионов.

В августе 1979 года на Международной конференции в Чикаго, посвященной лептонным и фотонным взаимодействиям, было сообщено об открытии физиками Гамбурга соударений с рождением трех струй, две из которых близко расположены одна к другой. В электродинамике известен процесс тормозного излучения фотона, вылетающего, как правило, под малым углом к направлению движения испустившего его электрона. Две близко расположенные струи можно по аналогии считать испусканием глюона одним из кварков.

Очарованный кварк

Одновременно с появлением понятия цвета в кварковой теории появился и четвертый тип кварка, названного очарованным, от английского *charm*, и обозначаемого буквой «с». Что объясняет этот с-кварк?

Ранее кварковая модель разрешала K^0_2 -мезону распадаться на пару $\mu^+ \mu^-$. В этом процессе нет передачи заряда от адрона паре лептонов, он мог бы управляться слабым нейтральным током. Согласно кварковой схеме K^0_2 -мезон состоит из странного s -кварка с зарядом $-1/3$ и нестранного антикварка d с зарядом $+1/3$. Предполагалось, что s и d -кварки переходят из-за слабого взаимодействия в мюоны противоположных знаков. Однако такой процесс не обнаруживается на опыте. Почему?

Для объяснения этого факта (отсутствия нейтрального тока у странного кварка) несколько теоретиков — американские Д. Бьеркен, М. Гелл-Ман, пакистанский А. Салам, японский И. Хара — и ввели независимо и одновременно в 1964 году четвертый кварк со столь красочным названием.

По новой схеме кварков стало уже четыре типа, называемых ароматами, а каждый имеет три цвета. В этой схеме странный кварк переходит в u -кварк, имеющий заряд $+2/3$ (напомним, что у странного кварка заряд $-1/3$). Разница зарядов должна передаваться образующимся лептонам. Поэтому распад странной частицы без передачи заряда от адрона лептонам и оказывается по новой кварковой схеме запрещенным.

Важное количественное подтверждение кварковая схема получила в опытах по аннигиляции электрона и позитрона в адроны и мюоны.

В процессе аннигиляции образуется виртуальный фотон, распадающийся на пару кварк—антикварк или два мюона с противоположными зарядами. Общее для обоих процессов — это электромагнитное взаимодействие фотона с электрическим зарядом кварка или мюона (в случае рождения кварка и антикварка мы регистрируем адроны). Вероятность процесса рождения частицы и античастицы пропорциональна квадрату электрического заряда. Если кварков существует несколько типов, то все они могут рождаться фотоном достаточно большой энергии, и эти вероятности суммируются. Поэтому отношение вероятностей аннигиляции электрона и позитрона в адроны к аннигиляции в мюоны равно сумме квадратов электрических зарядов кварков (учли, что заряд мюона равен 1). В схеме с одним кварком с зарядом $2/3$ и двумя — с зарядами $-1/3$ это отношение R равно: $R = (2/3)^2 + 2(1/3)^2 = 2/3$.

Из-за наличия у кварков цвета (9 кварков) отноше-

ние R вырастает в 3 раза. Если же энергии сталкивающихся частиц достаточно для образования пары s - и \bar{s} -кварка и антикварка с зарядом $2/3$, то уже получим, что $R = 3[2(2/3)^2 + 2(1/3)^2] = 3^{1/3}$.

Если энергия фотона очень велика, то может образоваться и пара из тяжелых лептона и антилептона. Поэтому в принципе при большой энергии отношение R может еще вырасти на 1.

Что же показали опыты на встречных электрон-позитронных пучках? Оказывается, при суммарной энергии электрона и позитрона, меньшей 3,5 гигаэлектронвольта, величина R равна 2, а с увеличением энергии до 4,5 гигаэлектронвольта R возрастает до 5. Это означает, что при низкой энергии могут родиться только 3 типа цветных кварков, а при большой энергии рождаются четвертый кварк и тяжелая лептон-антилептонная пара. Масса предсказываемого, таким образом, лептона оказалась равной около половины энергии, при которой обнаруживается рост числа R , то есть 2 гигаэлектронвольта. Вскоре после этого предсказания и открыли новый тяжелый лептон и частицы с очарованным кварком c .

Открытие пси-частиц

Появление в теории нового «кирпичика» мироздания (c -кварка) означает необходимость существования многих частиц с квантовым числом «очарование». Эти частицы образуются из c -кварка или его антикварка и 3 прежних кварков.

Долгое время не удавалось найти частицы, которые допускали бы такую интерпретацию. По аналогии с рождением странных частиц очарованные частицы должны рождаться парами, но при распаде «очарование» не должно сохраняться, так как c -кварк переходит в странный s -кварк.

Частицы, содержащие в своем составе гипотетический тяжелый очарованный кварк, трудно наблюдать из-за быстрого распада, но при переходе c -кварка в s -кварк должны регистрироваться случаи рождения одиночных странных частиц. В 1964 году Л. Б. Окунь предложил поставить опыты на нейтринном пучке для поиска очарованных частиц. Проведенные в Батавии в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми эксперименты на нейтринном пучке с использованием жидководородной пузырьковой камеры объемом 30 кубометров действи-

тельно показали существование процессов с рождением одиночных каонов. Это первое экспериментальное указание на существование в природе очарованных частиц.

В 1974 году были открыты новые, относительно долго живущие частицы, их назвали пси-частицами и стали рассматривать как систему из s -кварка и его антикварка в основном или возбужденном состоянии.

Первую из этих частиц открыли одновременно на протонном ускорителе в Брукхэйвенской национальной лаборатории на острове Лонг-Айленд близ Нью-Йорка и на встречных электрон-позитронных пучках накопительного кольца Стэнфордского центра линейных ускорителей при Массачусетском технологическом институте.

В 1975 году были открыты еще две пси-частицы того же сорта.

Подтверждения о наблюдении этих частиц поступили вскоре из ядерных центров Италии (Фраскати) и Западной Германии (Гамбург).

Летом 1975 года пси-частицу нашли и в опытах на Серпуховском ускорителе протонов. Пси-частица распалась на пару мюонов противоположных знаков.

Как же была открыта первая пси-частица?

Осенью 1974 года в Брукхэйвене американским физиком С. Тингом (китайцем по происхождению) был поставлен эксперимент на протонном пучке с энергией 28 гигаэлектронвольт. Бомбардировались ядра бериллия. Рождающиеся в реакции



электрон и позитрон регистрировались двухплечевым магнитным спектрометром*. В двухплечевом магнитном спектрометре электрон и позитрон отклоняются в противоположные стороны и на выходе спектрометра регистрируются детекторами. Измерив энергию и импульс электрона и позитрона, вычисляют с помощью соотношения $E = mc^2$ их суммарную релятивистскую массу M .

При обработке результатов опыта Тинга было получено распределение числа событий в зависимости от M .

* Спектрометр — это заимствованное из оптики наименование широкого класса приборов для анализа распределения по энергии (спектру) различных видов излучений. В магнитном спектрометре энергию и импульс частиц определяют по радиусу окружности, по дуге которой движутся частицы в магнитном поле.

Оказалось, что это распределение имеет вид резонансной кривой с максимумом при 3,1 гигаэлектронвольт и шириной всего в несколько мегаэлектронвольт. Энергетическое разрешение приборов не позволяло более точно измерить ширину резонансной кривой. Авторы открытия назвали резонанс джи-частицей (обозначается буквой J).

Одновременно с этим опытом американские физики во главе с Б. Рихтером поставили в Стэнфорде эксперимент на пересекающихся электрон-позитронных пучках. Электроны и позитроны предварительно ускорялись до энергии 2,6 гигаэлектронвольт и направлялись в накопительное кольцо (см. рис. 14). Рождавшиеся в результате соударения частицы регистрировались спектрометром, отбиравшим частицы противоположного знака.

Опыт показал, что в распределении числа событий по массе M электрона и позитрона или других пар частиц наблюдается резонанс с массой 3,1 гигаэлектронвольт и шириной 50 килоэлектронвольт. Такой ширине резонанса соответствует время жизни, в тысячу раз большее, чем для других известных резонансов больших масс.

Новую частицу авторы и назвали пси-частицей (обозначается буквой ψ). Сообщение об этом открытии было опубликовано в том же выпуске журнала, что и статья с описанием опытов Тинга. Оказалось, что открыли одну и ту же частицу одновременно две экспериментальные группы Тинга и Рихтера. Теперь эту частицу называют джи-дробь-пси-частицей и обозначают так: J/ψ -частица.

В опыте Рихтера по электрон-позитронному соударению была открыта и вторая частица — резонанс ψ_2 с массой 3,7 гигаэлектронвольт.

За открытие J/ψ -частицы Тингу и Рихтеру присуждена в 1976 году Нобелевская премия.

В 1975 году в Стэнфорде открыли ψ_3 - и ψ_4 -частицы с массами 4,1 и 4,4 гигаэлектронвольт, а затем изучили и типы их распада. У ψ_3 - и ψ_4 -частиц время жизни не отличается от ядерного времени 10^{-23} секунды, типичного для всех тяжелых резонансов.

Пси-частицы стоят особняком от остальных частиц. Их характерная особенность в том, что они относятся к классу мезонов, но слишком тяжелы для него и при столь большой массе живут слишком долго. Это можно

объяснить тем, что s -кварк переходит (распадается) в странный кварк, причем распад происходит медленно, так как «управляется» слабым взаимодействием.

Масса s -кварка предполагается равной половине массы J/ψ -частицы.

Открытие очарованных мезонов и гиперонов

В 1976 году в Стэнфорде на встречных электрон-позитронных пучках изучались события с рождением пионов и одиночных странных частиц — каонов. Строились распределения числа событий по массам пар частиц $K^+\pi^-$ и $K^-\pi^+$. Экспериментаторы искали очарованные частицы, которые в отличие от J/ψ -частиц должны иметь суммарное «очарование», не равное 0. Такие частицы предсказывались кварковой моделью с четвертым кварком.

Пионы и каоны различались по времени пролета их через систему сцинтилляционных детекторов. Это обусловлено тем, что у них разные массы. Время их пролета регистрировалось с точностью до триллионных долей секунды, и по нему мезоны различались. Распределение числа событий по массам пар частиц имело пик при массе 1865 мегаэлектронвольт. Так открыли очарованные мезоны, названные D^0 - и D^+ -мезонами.

Эксперименты в других центрах подтвердили существование D -мезонов.

Время жизни D -мезона — десятиллионная доля секунды. В ядерной фотоэмульсии удастся увидеть след, оставленный этой частицей. Длина следа составляет всего сотые доли миллиметра.

Изучены типы распадов очарованных мезонов.

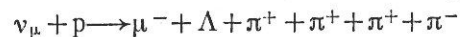
Оказалось, что длину следа D -мезона удастся измерить только в ядерной фотоэмульсии, а в пузырьковой камере этого сделать нельзя, потому что диаметр пузырьков превышает длину следа.

Наибольшее число случаев наблюдения очарованных частиц имеет Национальная ускорительная лаборатория им. Ферми.

Опыты по поиску очарованных частиц чрезвычайно трудоемки и сложны. Измерено всего около сотни случаев рождения очарованных частиц. Опыты требуют объединения разных методов исследования, длительных и быстрых расчетов на ЭВМ. Поэтому эксперименты ставятся международными коллективами ученых.

D -мезон состоит из очарованного и обычного, нестрannого, кварков. Но кварковая модель предполагает также существование мезонов с очарованным и странным кварками вместе (точнее, с кварком и антикварком). Такие мезоны в электрон-позитронных соударениях должны рождаться парами из-за сохранения странности и очарования (в распаде эти квантовые числа не сохраняются). Предсказывалось, что такой новый мезон должен распадаться на пион и эта-мезон. Последний, в свою очередь, быстро распадается на два гамма-кванта с энергией свыше 100 миллионов электронвольт у каждого. Их суммарная энергия должна равняться массе эта-мезона. Новый мезон открыли в Гамбурге в 1977 году. Его обозначили следующей после D буквой латинского алфавита F -мезоном. Масса F -мезона составляет 2 гигаэлектронвольта.

Во второй половине 70-х годов были открыты также и барионы с «очарованием». Их наблюдали в нейтринных пучках (в Брукхэйвене и ЦЕРНе) в реакциях, в которых нарушалось известное для слабого взаимодействия равное изменение странности и электрического заряда адронов. Например, в реакции



изменение странности у адронов в ходе процесса равно -1 , а электрического заряда $+1$. Такие реакции как раз и предсказывались моделью с четвертым s -кварком. Барион проявился как резонанс в распределении по массе частиц $\Lambda \pi^+ \pi^+ \pi^+$. Новый барион обозначен так: Σ_c^{++} . Его масса, оказалось, равна 2426 мегаэлектронвольтам, что согласуется с предсказанием кварковой модели.

Сейчас открыты очарованные гипероны Σ_c^{++} , Λ_c^+ , $\bar{\Lambda}_c^-$, $\bar{\Sigma}_c^0$. Теория предсказывает существование всего 12 очарованных гиперонов со спином $1/2$, из которых 4 уже известны.

Время жизни всех очарованных частиц — десятиллионная доля секунды. Это по-настоящему стабильные относительно сильного взаимодействия частицы, распадаются они только за счет слабого взаимодействия.

Открытие ипсилон-резонанса со скрытой прелестью

В конце 70-х годов появилось сообщение об открытии самого тяжелого мезонного резонанса, который содержит еще более тяжелый кварк, названный прелестным, или b -кварком. По-английски «прелестный» — *beauty*.

В Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми еще задолго до того, как там смогли получать пучки протонов с энергией 400 гигаэлектронвольт, готовился эксперимент по поиску возможных резонансов в системе пар лептонов разных знаков: e^+e^- или $\mu^+\mu^-$. Планировалось регистрацию частиц осуществлять сложной системой детекторов: двухплечевым магнитным спектрометром, сцинтилляционными счетчиками, искровыми проводочными камерами. Ранее в такого рода опытах открывали джи-частицу.

В 1975—1976 годах такой эксперимент поставили: была осуществлена бомбардировка протонами с энергией 400 гигаэлектронвольт бериллиевой мишени и регистрация пар лептонов противоположных знаков. С двух сторон от направления пучка под углом в несколько градусов стояли магнитные спектрометры. Вместе они образовали подобие воронки. В спектрометры попадали лептоны, вылетающие в пределах от 3 до 9 градусов в обе стороны. В системе центра масс высокоэнергетических лептонов угол между двумя спектрометрами составлял 90 градусов, и если в один влетал электрон, то в другой попадал позитрон.

Когда построили график распределения числа событий по массам лептонных пар противоположных знаков, он показал, что были зарегистрированы частицы с массой свыше 5 гигаэлектронвольт. Это было указание на существование сверхтяжелого резонанса. Более точно определить массу этого резонанса в том эксперименте по чисто техническим причинам не удалось, и опыты продолжались с энтузиазмом.

Чтобы снизить фон от событий с рождением адронов, пространство между двумя спектрометрами и в них самих заполнили многометровым слоем металла, поглощавшим адроны. Лептоны же проходили сквозь него. Из 27 тысяч событий, на которые отреагировала установка, отобрали достоверные и снова построили график — распределение числа событий по массе пар лептонов. Он, как говорят физики, имел резонансный вид с максимумом

мом при массе 9,5 гигаэлектронвольт. Время жизни резонанса составляло 10^{-22} секунды.

Так в 1977 году был открыт самый тяжелый мезонный резонанс — тяжелее ядер металла бериллия! Этот резонанс обозначили греческой буквой «ипсилон». Но если быть точным, то следует сказать, что открытие совершалось на протяжении 10 лет начиная с 1968 года.

В последующие несколько лет в опытах ряда научных коллективов на встречных электрон-позитронных пучках наблюдали этот резонанс. Более того, было зарегистрировано целое семейство частиц с близкими массами: 9,5; 10 и 10,3 гигаэлектронвольт. Их можно рассматривать как возбужденные состояния системы из b -кварка и его антикварка.

Теория предполагает существование симметрии между кварками и лептонами, которые должны группироваться в три пары:

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}.$$

Для наличия симметрии приходится предполагать существование в природе шестого кварка — t , «истинного» (от английского *truth*). Частицы с t -кварком еще не открыты. С введением гипотезы о наличии t -кварка теория предсказывает существование еще десятков новых сверхтяжелых частиц, образованных из комбинаций t -кварка и других кварков. Подтвердит ли это эксперимент?

Выше приведена таблица известных сегодня элементарных частиц. Античастицы не показаны. Возбужденные состояния частиц отмечены звездочками. Каждому из них соответствует целое семейство короткоживущих частиц — резонансов. В таблице указаны значения масс и времен жизни частиц.

Дисперсионная теория сильного взаимодействия

С явлением дисперсии мы сталкиваемся, когда видим радуго. Это солнечный белый свет пробивается сквозь завесу дождя и, преломляясь в каплях воды, разбивается на составляющие лучи всех цветов. Так и прошедший через призму свет разлагается на лучи всех цветов. Разложение белого света на отдельные цветовые лучи — это дисперсия света.

Дисперсия происходит потому, что показатель преломления света в воде, да и во всех прозрачных средах, зависит от частоты света или длины волны, то есть от цвета лучей (напомним читателю, что длина волны λ и частота ν связаны соотношением $\lambda = c/\nu$, где c — скорость света). Все наблюдаемые человеческим глазом лучи имеют длину волны в несколько сотысячных долей сантиметра. Красному цвету отвечает большая длина волны, а фиолетовому — меньшая, причем вторая в 2 раза меньше первой. В интервале между ними располагаются все цвета радуги.

Показатель преломления наибольший для красных лучей, а наименьший — для фиолетовых. Поэтому красные лучи сильнее преломляются, фиолетовые — слабее: солнце уже зашло за горизонт, а мы видим освещенное розовое небо — это красные лучи, сильнее преломляющиеся в земной атмосфере, все еще проникают на Землю.

Величина дисперсии света определяется разностью показателей преломления для красного и фиолетового цветов. Эта величина наибольшая из всех прозрачных тел у алмаза: у него она в 5 раз, например, больше, чем у кварца. Это одна из причин характерной для алмаза игры цветовых лучей. «Алмазный» блеск обусловлен сочетанием самого высокого для кристаллов показателя преломления и наибольшей дисперсии. Луч света, попадая в кристалл алмаза, претерпевает у противоположной поверхности кристалла полное отражение и выходит обратно, испытывая дисперсию, и оказывается в поле нашего зрения в виде спектра цветовых лучей. Это и дает ту красивую радужную игру цветов и блеск, которые характерны для бриллиантов — ограненных алмазов.

В 20-х годах XX века нидерландские физики-теоретики Х. Крамерс и Р. Крониг исследовали распространение электромагнитного излучения (световая волна, как мы знаем, — частный случай электромагнитной волны) в прозрачной среде. Они показали, что постулат теории относительности, запрещающий сигналам распространяться быстрее скорости света в вакууме, приводит к существованию формулы, связывающей в едином соотношении показатели преломления для электромагнитных волн разных частот. Эта формула была названа дисперсионным соотношением, так как именно зависимость

показателя преломления от частоты и определяет дисперсию электромагнитной волны.

Запрет теории относительности на скорость распространения сигналов — это реализация важного физического условия — принципа причинности, то есть правильной временной последовательности событий в виде причины и следствия.

В физике элементарных частиц дисперсия проявляется в зависимости вероятности рассеяния волн-частиц от энергии — частоты (напомним, что согласно квантовой механике частицы — это волны, а их энергии — это частоты), роль показателя преломления играет вероятность рассеяния как функция энергии. Действительно, частицы-волны рассеиваются на ядрах мишени и летят в разные стороны в зависимости от начальной энергии и вероятности рассеяния.

Исходя из принципа причинности для вероятностей также выводятся формулы, связывающие вместе вероятности рассеяния при разных энергиях частиц по аналогии с формулой Крамерса—Кронига для показателя преломления. Эти математические выражения получили в физике частиц также название дисперсионных соотношений.

Физической основой дисперсионных соотношений является условие причинности, но, записанное для микрочастиц, оно носит название принципа микропричинности. Поясним его подробнее. Допустим, в двух разных точках пространства произошло по событию, каждое — в свой момент времени. Спрашивается: может ли более раннее из этих событий быть причиной второго? Ответ такой: если расстояние между упомянутыми точками пространства так велико, что свет не может его пройти за интервал времени между событиями, то первое событие не может быть причиной второго — ведь информация не может распространяться быстрее скорости света! Это и есть принцип микропричинности.

Теория дисперсионных соотношений использует еще два постулата, выполнение которых не вызывает сомнения, так как они проверены во многих опытах. Это — релятивистская инвариантность теории, о которой мы говорили ранее (физические законы подчиняются теории относительности), и второй — суммарная вероятность частицы рассеяться или пройти сквозь мишень без рассеяния равна 1. Поэтому проверка дисперсионных соот-

ношений на опыте — это проверка выполнимости принципа микропричинности.

В физике элементарных частиц дисперсионные соотношения впервые были предложены в 1954 году теоретиками В. Тиррингом, М. Гелл-Маном и М. Гольдбергером. Они записали дисперсионное соотношение для рассеяния фотонов и частиц с нулевым спином на нуклонах.

Дальнейшие исследования показали, что математически корректно доказать справедливость дисперсионных соотношений — задача непростая. В 1956 году в докладах на Международном математическом конгрессе в Сиэттле (США) было предложено два вывода дисперсионных соотношений — американским физиком К. Симанчиком для рассеяния пионов на нуклоне вперед, другое — советским теоретиком Н. Н. Боголюбовым для такого же процесса, но при произвольном угле рассеяния. Это строгое доказательство как раз и основано на трех упомянутых выше постулатах.

Этап в использовании дисперсионной теории связан с именем московского физика И. Я. Померанчука. Он в 1958 году на основе дисперсионных соотношений сформулировал теорему о том, что вероятность рассеяния частицы на нуклоне становится равной вероятности рассеяния античастицы на нуклоне при бесконечном увеличении энергии частиц. Но при этом считалось, что с ростом энергии эти вероятности становятся постоянными величинами. Однако в Серпухове, как мы уже говорили, был открыт эффект — рост этих вероятностей с увеличением энергии выше 70 гигаэлектронвольт. Советские теоретики Г. Г. Волков, А. А. Логунов и М. А. Мествиришвили показали, что вероятности рассеяния частиц и античастиц все равно сравниваются с ростом энергии.

Дисперсионные соотношения связывают в одной формуле вероятности процессов во всем допустимом диапазоне изменения энергий, включая и бесконечно большую. Но измерения вероятностей реакций нельзя провести при бесконечно высокой энергии, а только при энергиях, достигнутых на ускорителях. Поэтому проверка дисперсионных соотношений в таком виде требует введения дополнительного к трем постулатам предположения о поведении процессов при сверхвысоких (вплоть до бесконечно больших) энергиях. Только после этого становится возможным проверка таких дисперсионных соот-

ношений. Введение дополнительного предположения снижает определенность выводов о выполнимости принципа микропричинности из проверки дисперсионных соотношений на опыте. Поэтому интерес представляют дисперсионные соотношения, связывающие вероятности рассеяния частиц при уже достигнутых энергиях на ускорителях. Они выведены в 70-х годах советскими теоретиками Ю. С. Верновым и М. Н. Мнацакановой.

Большим успехом теории дисперсионных соотношений было предсказание существования ро-мезона — резонанса в системе двух пионов.

Вся совокупность проверок дисперсионных соотношений показала их справедливость на опыте и лежащих в их основе постулатов. Однако такая проверка проведена только при современных энергиях частиц, которые в соударениях сближаются с другими частицами до расстояния 10^{-16} сантиметра. Подтверждение принципа микропричинности для этих расстояний важно потому, что ранее были сомнения в выполнимости принципа причинности на сверхмалых расстояниях.

Дело в том, что существующие в расчетах квантовой теории поля бесконечные выражения, о которых мы уже говорили в 6-й главе, связаны с используемым в теории предположением о точечных размерах частиц. Если же считать, что элементарные частицы имеют не нулевую, а конечную протяженность, то бесконечные величины в расчетах исчезают. Однако существование конечного размера у частицы противоречит теории относительности. Поэтому предполагалось, что существует некий малый размер, называемый фундаментальной длиной, при рассмотрении которой становятся несправедливыми наши физические представления, в первую очередь теория относительности. Если бы это ожидание оправдалось, то предстояло бы еще одно радикальное преобразование физики, сопоставимое по своим последствиям с созданием теории относительности или квантовой теории.

Роль такой фундаментальной длины мог играть размер элементарной частицы, соответствующий ее длине волны. Так, длина волны электрона равна $4 \cdot 10^{-11}$, нуклона — $2 \cdot 10^{-14}$, а дубль-в-бозона — $2 \cdot 10^{-16}$ сантиметра. Однако проверка дисперсионных соотношений вплоть до энергии в сотни гигаэлектронвольт, приводящей к сближению частиц до 10^{-16} сантиметра, показала, что современные физические представления остаются верными.

Поэтому гипотетическая фундаментальная длина не может быть связана с электромагнитным, сильным или слабым взаимодействиями. Возможно, что она обусловлена гравитационным взаимодействием. Будущее покажет.

Теория и следствия, вытекающие из возможного существования фундаментальной длины, всесторонне изучены в работах советских теоретиков Д. И. Блохинцева, М. А. Маркова, В. Г. Кадышевского и Д. В. Киржница.

Следует особо рассказать о математической стороне теории.

Математической основой дисперсионной теории стала теория так называемых аналитических функций.

Аналитичность. Что это такое?

В школьном курсе математики мы привыкли иметь дело с непрерывными функциями одной переменной, графики которых — «гладкие» кривые. Это и есть аналитические функции одной переменной. Например, путь, проходимый телом при равноускоренном движении, — аналитическая функция времени. Но если на графике функции появятся изломы, скачки, то это уже будут точки, в которых функция теряет свойство аналитичности. Такие точки называются особыми точками аналитических функций.

Более сложно понятие аналитичности для функции от точки на поверхности. Рассмотрим, например, поверхность Земли с достаточно разнообразным рельефом — равниной, холмами. Расстояние от каждой точки этой поверхности до центра Земли непрерывно, «гладко» меняется, если точка перемещается по поверхности. Это расстояние — также аналитическая функция от точки на поверхности Земли. Откуда бы мы ни прошли в определенную точку поверхности, расстояние ее до центра Земли будет одно и то же. Это необходимое свойство аналитических функций.

Но вот на пути движения по поверхности встретилась пропасть. Пройдя через край пропасти, точка поверхности уже оказывается скачкообразно на дне пропасти, а значит, и расстояние от нее до центра Земли скачкообразно изменилось. Расстояние до центра Земли становится неаналитической функцией точки поверхности на краю пропасти.

Рассмотрим такой пример. Автомобиль едет по слегка холмистой местности, скорость не переключается.

В зависимости от рельефа местности скорость машины то увеличивается, то уменьшается (конечно, незначительно), но движение все время «гладкое». И скорость, и путь будут аналитическими функциями времени. Опытный взгляд позволяет, наблюдая за движением автомобиля, определить, с какой скоростью машина движется, и предсказать ее дальнейшее перемещение. Таким «прогнозом» всегда занимается пешеход, рискованно перебегающий дорогу перед машиной. Тут мы столкнулись с важнейшим свойством аналитических функций, сделавшим их полезными для физики, — их поведение предсказуемо: если аналитическая функция известна на каком-то участке аргумента (в нашем примере — пути), то ее поведение предсказуемо и при других значениях аргумента (в последующие моменты времени).

Рассмотрим еще раз пример с автомобилем и неразумным пешеходом. Пусть водитель переключил скорость. Ясно, что в момент переключения ускорение движения автомобиля меняется, скорость как функция времени испытывает излом, и пешеход в первый момент не может предсказать движение автомобиля. Это потому, что в момент переключения скорости сама скорость и путь машины как функция времени становятся неаналитическими функциями. Этот момент времени — особая точка аналитической функции (пути от времени). Общее свойство аналитических функций — их поведение предсказуемо только до особой точки.

Однако через некоторое время после переключения скорости движение машины будет опять «гладким», а движение предсказуемо.

Особых точек у аналитической функции может быть много (как много может быть и переключений скоростей).

Добавим, что и край пропасти для движения машины — точка нарушения аналитичности. Если автомобиль переедет через него, то его равномерное движение сменится свободным падением, ускорение движения — ускорением свободного падения, которое, как нам известно из школьного курса, равно 9,8 метра в секунду в квадрате (m/c^2). Здесь особая точка в движении связана с изменением закона движения машины.

В примере с машиной все особые точки связаны с изменением режима ее движения или закона движения. Во всех случаях это было обусловлено внешними для ма-

шины причинами — либо переключением скорости, либо скачкообразным изменением рельефа местности.

Теперь читатель мог почувствовать, что точки нарушения аналитичности — это действительно «особые» точки. Они являются сигналом о качественном изменении в ходе изучаемого процесса. Поэтому очень важно их изучать. Не зная их, не напишешь и дисперсионное соотношение.

Интересно, что все физические величины — аналитические функции, за исключением отдельных особых точек. Вероятность рассеяния также является аналитической функцией энергий частиц, углов рассеяния.

Во 2-й главе мы говорили о том, что реальное взаимодействие частиц происходит путем обмена между ними ненаблюдаемыми, виртуальными, частицами. Если энергия соударяющихся частиц растет, то при какой-то ее величине становится возможным рождение большего (чем ранее) числа виртуальных частиц одновременно. С этого значения энергии течение реакции качественно меняется. Такие значения энергии и будут особыми точками вероятности как функции энергий.

Особенности вероятностей реакций по энергиям приводят к образованию резонансов в рассеянии частиц и ядер.

Исследование особых точек вероятностей реакций в значительной степени обязано работам советских теоретиков — Л. Д. Ландау, Л. Б. Окуня, Л. Д. Блохинцева, Э. И. Долинского, В. С. Попова, Ю. А. Симонова.

Дополнив 3 аксомами дисперсионной теории предположением об определяющей роли особенностей в поведении вероятностей с энергией, получают формулы, связывающие воедино вероятности уже разных реакций. Эти формулы подтверждаются опытом, что является большим успехом дисперсионной теории. С их помощью можно даже изучать процессы, не наблюдаемые в прямых опытах, например, с нестабильными частицами (нестабильные ядра нельзя использовать в качестве мишеней). Такие приближенные дисперсионные соотношения изображаются в виде фейнмановских диаграмм (о них мы рассказывали ранее), в которых виртуальными частицами являются нуклоны и даже легкие ядра.

Часть IV.

Микромир и макрокосм

ГЛАВА 9. СТАБИЛЬНОСТЬ МИРА ПОД СОМНЕНИЕМ

Дайте мне материю, я построю из нее мир.

И. Кант

Много земли перерывают золотоискатели и находят немного.

Гераклит

В поисках распада протона

Физики говорят: вещество во Вселенной стабильно. Как это понимать? Конечно, не в том смысле, что в мире ничего не происходит. Нет, происходит: рождаются и умирают звезды, возникают и разрушаются горы, распускаются и увядают цветы... Словом, как сказал древний мыслитель, все течет, все изменяется.

Но именно потому, что существуют и звезды, и горы, и цветы, мы со всей определенностью можем утверждать, что вещество, из которого они состоят, стабильно. Стабильность вещества объясняется стабильностью протона — самого «простого» атомного ядра: сохранение барионного заряда объясняет стабильность вещества во Вселенной. Протоны не распадаются, так как не существует более легкого бариона. Однако закон сохранения барионов — это опытный факт, то есть факт, установленный наблюдением, стало быть, степень его достоверности зависит от точности наблюдений и условий, в которых они проводятся. Нельзя исключить того, что распад протона до сих пор не нашли потому, что он происходит редко, и для его обнаружения нужна особая постановка опыта и сверхчувствительная аппаратура.

Современный физический эксперимент обычно требует создания сложной установки и длительных усилий коллектива ученых, инженеров, их энтузиазма. Вот почему так важна предварительная работа теоретиков по предсказанию возможных явлений и эффектов. Такая работа рождает надежду на успех, на достижение положительного результата.

Соображения о возможном распаде протона и несохранении барионного заряда с очень малой вероятностью были выдвинуты несколько лет назад в теоретических моделях. В них три вида сил, управляемых микромиром, рассматриваются как проявление некоего единого взаи-

модействия. Теория объединения трех сил строится по аналогии с теорией электрослабого взаимодействия. Согласно новой идее, получившей название «великого объединения», при сверхвысоких энергиях — в триллионы триллионов электронвольт — слабое взаимодействие становится сравнимым по силе с электромагнитным и сильным взаимодействиями. При таких больших энергиях различие между барионами и слабовзаимодействующими частицами — лептонами исчезает и возможны переходы между ними, а значит, и несохранение барионного заряда. Виртуальные и реальные превращения «барион—лептон» и наоборот становятся правилом, а не исключением, и потому реализуются с большой вероятностью.

Однако столь высокие энергии недостижимы не только на современных ускорителях, но и на ускорителях будущего. Не обладают такой энергией и частицы, прилетающие из космоса. При низких же энергиях вероятность превращения бариона в лептон уменьшается. Тем не менее остается некоторая вероятность распада протона на позитрон и пион или нейтрино и пион. В таких распадах выполнялись бы все законы, кроме законов сохранения барионного и лептонного зарядов. Добавим, что распады аналогичного типа могут существовать и у нейтрона.

Согласно теоретическим моделям время жизни протона оказывается больше, чем 10^{31} лет. А ведь время существования Вселенной всего 10^{10} лет! Но чтобы увидеть распад протона, совсем не обязательно долго на него «смотреть». В веществе, содержащем 10^{31} протонов, за год в среднем может распасться 1 протон. А если взять вещества еще в сотни раз больше, то наблюдать распад протона можно будет уже каждый день. В 10 тоннах воды, например, имеется около 10^{31} нуклонов.

Эксперименты по поиску распада протона уже ведутся. Распад протона или связанного в ядре нейтрона ищут наблюдением за возможными световыми вспышками в нескольких тоннах прозрачной жидкости. Вспышки должны вызываться аннигиляцией позитрона, продукта распада протона, с одним из электронов атомов.

Поскольку космические лучи посредством ряда превращений частиц также могут вызвать образование фотонов в среде, весь опыт необходимо проводить в усло-

виях малого фона космического излучения. Вот почему эксперимент проводят под землей, на больших глубинах. Так, группа физиков нескольких американских университетов с 1964 по 1971 годы наблюдала за 20 тоннами жидкого сцинтиллятора, помещенного в камеру на глубине 3 километра в золотоносной шахте Южной Америки. Число замеченных световых вспышек было так мало, что все они могли быть объяснены космическим излучением или радиоактивным фоном окружающих пород. Вывод: время жизни протона превышает 10^{30} лет.

Сейчас проводятся новые опыты. В соляной шахте Мортон в штате Огайо на глубине 700 метров наблюдают за 10 тысячами тонн воды в камере. При распаде одного из 10^{33} протонов и нейтронов в центральной части объема должен образоваться позитрон, летящий со скоростью, превышающей скорость света в воде. В этом случае позитрон вызовет свечение среды — то самое, которое называется черенковским излучением (мы о нем уже говорили ранее). Чтобы зарегистрировать черенковский свет от позитрона, на стенках камеры установлено 2 тысячи фотоумножителей.

Аналогичные опыты ведутся в золотой шахте Колар в Индии, в туннеле под Монбланом между Францией и Италией, в нашей стране в туннеле в Баксанской долине под горой Андырчи на Кавказе.

Технические устройства во всех опытах нацелены на то, чтобы компенсировать крайне малую вероятность протонного распада большим количеством вещества и хорошей экранировкой его от космического фона. Эксперименты различаются главным образом по составу и количеству используемой жидкости, типу и конструкции приборов, способам подавления случайных сигналов от космических частиц.

В экспериментах в золотой шахте Колар и в туннеле под Монбланом ищут распады атомов в железе и бетоне, применяют газоразрядные трубки, способные непосредственно регистрировать энергичные заряженные частицы, образовавшиеся от распада протонов. Здесь наблюдалось несколько событий, которые истолковывались как распад протона. Однако не все физики с доверием восприняли такое толкование. Не исключено, считают они, что эти сигналы были вызваны вторичными нейтронами, выбитыми космическими лучами из окружающей установку грунта и затем влетевшими в нее,

Если удастся надежно зарегистрировать распад протона, то это будет означать, что сделан решающий шаг в построении единой теории трех типов сил в природе.

О барионной асимметрии Вселенной

Энергии земных и космических частиц малы, но на ранней горячей стадии расширения Вселенной, образовавшейся в результате Большого взрыва из малого объема, энергии могли быть достаточными для сравнения слабого, электромагнитного и сильного взаимодействия. Для этого нужна температура в 10^{27} градусов, соответствующая энергии «великого объединения» в сотни триллионов гигаэлектронвольт. Естественно также предположить, что Вселенная образовалась из состояния, симметричного относительно числа частиц и античастиц, то есть имела нулевой барионный заряд («Математики любят прежде всего симметрию». — говорил Максвелл). Процессы взаимного превращения частиц происходят так быстро, что Вселенная, как и всякая физическая система с большим числом частиц, должна была практически мгновенно после образования прийти в состояние термодинамического равновесия. В этом состоянии вероятности превращения частиц в прямом и обратном направлении равны, а соотношение между числами разных частиц постоянно. Так, частицы и античастицы должны аннигилировать в гамма-кванты, а сами гамма-кванты рождают в полях других частиц снова барион-антибарионные пары частиц. Поэтому барионный заряд Вселенной должен был бы сохраняться равным нулю, и в природе были бы как «миры», так и «антимир». Так и считали, пожалуй, до конца 60-х годов. Однако поиски «свидетелей» антимиров ни к чему не привели.

Астрофизические измерения показывают, что Вселенная состоит, по-видимому, только из вещества — протонов и электронов, образующих атомы, а не из антипротонов и позитронов. Античастицы не наблюдаются в приходящих из космоса лучах.

При оптических измерениях излучения звезд отличить вещество от антивещества нельзя из-за истинной нейтральности фотонов, одинаковых и в мире, и в антимире. Однако если бы во Вселенной вещество соседствовало с антивеществом, то на границе их соприкосновения они аннигилировали бы в гамма-излучение с

характерной для такого процесса энергией. Но такое излучение тоже не наблюдается. Значит, и звезды в Галактике, и галактики в скоплениях галактик, и омывающий их межгалактический газ состоят из вещества.

Конечно, не исключено, что сами скопления галактик, разделенные расстояниями в сотни миллионов световых лет, целиком состоят либо из вещества, либо из антивещества. Из-за большой пространственной раздельности скоплений галактик аннигиляции вещества между ними не будет. Однако космология не предложила модели эволюции Вселенной, которая объяснила бы такую крупномасштабную неоднородность.

Физическая модель образования барионной асимметрии Вселенной была предложена советскими теоретиками. Красота этой модели в том, что ее результат не зависит от начальных условий существования Вселенной, которые поэтому и не надо объяснять. Оказывается, имела или нет Вселенная в момент Большого взрыва нулевой барионный заряд, это неважно. На стадии термодинамического равновесия все равно число частиц и античастиц должно было выравняться. Но чем же тогда объяснить образование избытка барионов над антибарионами и отсутствие «антимира»?

Астрономические наблюдения показали, что видимая часть Вселенной расширяется. Если это предположить и для всей Вселенной, то ее средняя температура должна уменьшаться, так как здесь действует обычный закон охлаждения газа при расширении. Но в этом случае уже на ранней стадии развития Вселенной равновесие между числом частиц и античастиц могло нарушиться в пользу одного из типов частиц, так как не выполняется важнейшее условие термодинамического равновесия — не сохраняется постоянство средней температуры всей физической системы. Напомним, что термодинамическое равновесие подразумевает существование в среде равного числа разных типов частиц, если их средняя энергия, соответствующая температуре, много больше масс частиц. То есть первоначально должно быть равное число барионов, фотонов и нейтрино. Однако измерения состава космических лучей показывают, что среднее число фотонов в кубическом сантиметре в космосе равно 500, а число протонов — в миллиард раз меньше — всего 1 протон на кубометр пространства.

Какой физический процесс мог оказаться ответствен-

ным за сдвиг химических реакций в пользу образования во Вселенной вещества, а не антивещества? Как объяснить различие в плотности фотонов и протонов во Вселенной?

Здесь уместно вспомнить о том, что, как мы знаем из главы 7, слабое взаимодействие разрешает существование в природе процессов, не симметричных относительно образования вещества и антивещества; нейтральный K^0_2 -мезон распадается с большей вероятностью на отрицательно заряженный пион, позитрон и нейтрино, чем на зарядово-симметричные частицы — положительно заряженный пион, электрон и антинейтрино (эти три частицы являются античастицами первым трем). С учетом такой возможности и строится модель «горячей» Вселенной, существовавшей в первые доли секунды с момента образования.

В начале, в момент Большого взрыва, когда Вселенная только начала расширяться, ее температура была сколь угодно высокой, и могли рождаться частицы, являющиеся переносчиками единого электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий, о которых рассказывалось в предыдущем разделе. Как показывает теория, масса таких частиц соизмерима с энергией, при которой происходит, возможно, слияние трех типов взаимодействий в одно, то есть составляет 10^{14} гигаэлектронвольт. Эти гипотетические частицы, которые никогда не удастся наблюдать из-за их невероятно большой, макроскопической массы — как масса пылинки, — называются хиггсовыми бозонами (по имени введшего их в теорию голландского теоретика П. Хиггса). Предполагается, что хиггсовы бозоны распадаются асимметрично относительно вещества и антивещества с большей вероятностью на вещество, причем барионов первоначально должно образоваться больше, чем антибарионов, всего на миллиардную часть.

При дальнейшем расширении Вселенной все антибарионы проаннигилировали с барионами и осталась только миллиардная часть первоначального числа барионов. А мы выше говорили о том, что в первоначальный момент во Вселенной была равная плотность фотонов и барионов. Именно поэтому плотность числа барионов и составляет теперь во Вселенной только миллиардную долю от плотности числа фотонов (количество фотонов мало изменилось за время расширения Вселенной),

Конечно, все рассуждение справедливо, если природа «разрешает» идти процессам с несохранением барионного заряда с малой вероятностью. Поиски распада протона как раз и направлены на открытие этой закономерности, которая хоть и не установлена, но уже используется при построении модели Вселенной.

Каким образом теория объясняет суммарный нулевой электрический заряд Вселенной? Ведь все небесные тела двигаются по закону тяготения, а не по закону Кулона, значит, они нейтральны!

Что говорит теория о суммарном лептонном заряде?

Компенсация электрического заряда протонов происходит зарядом электронов. Лептонный же заряд электронов может компенсироваться лептонным зарядом антинейтрино. Тогда и число антинейтрино должно во Вселенной оказаться больше, чем нейтрино. Но вряд ли это когда-либо удастся проверить в эксперименте.

ГЛАВА 10. НЕЙТРИНО И КОСМОС

Нейтрино — самая маленькая частица материи, с которой имеет дело человек; самая большая — Вселенная. Чтобы попытаться понять одно через другое, надо связать размеры, в пределах которых лежат все утверждения законов природы. Если ядерные реакции играют роль в катаклизмах рождения Вселенной, как мы допускаем, то какая доля первичной энергии переходит в нейтринное поле? Эти неуловимые с начала образования Вселенной нейтрино составляют вклад в ее гравитационное поле, и если так, какова их плотность, энергетический спектр и угловое распределение?

Ф. Рейнес, К. Коуэн

Этот космос, один и тот же для всего существующего, не создал никакой бог и никакой человек, но всегда он был, есть и будет вечно живым огнем, мерами загорающимся и мерами потухающим.

Гераклит

Масса нейтрино и Вселенной

Если современные опыты окончательно докажут, что у нейтрино есть масса, то это будет иметь огромное значение для космологии. Дело в том, что согласно приня-

той ныне теории тяготения Вселенная не может бесконечно расширяться (из измерений американского астронома Э. Хаббла известно, что галактики разбегаются и Вселенная расширяется) и начнет с какого-то момента сжиматься. Но только в том случае, если ее масса достаточно велика, то есть средняя плотность вещества в ней превышает величину, названную критической (критическая для поведения Вселенной) и равную 10^{-29} грамма на кубический сантиметр. Однако вопрос о средней плотности вещества в мире остается открытым, поскольку те способы ее оценки, которыми пользуется космология, дают разные результаты. А таких способов два.

При одном способе массы галактик определяют по наблюдению движения входящих в них звезд. Оно происходит под действием силы тяготения, и измерение скоростей движения звезд позволяет найти их массы. Масса галактики определяется как сумма масс входящих в них звезд. Соответствующая этому способу измерения плотность вещества в космосе составляет всего несколько процентов от критической.

При другом способе массы галактик определяют, изучая их движение в скоплениях галактик. Этим способом измеряется вся, а не только видимая часть массы, как в первом случае, учитывается возможность существования в пространстве между звездами вещества, которое не излучает, а потому остается для нас невидимым. Измеренная таким способом масса галактик превышает в десятки раз найденную первым способом и может оказаться больше критической. Это и есть проблема «скрытой массы» в астрономии.

Чтобы поверить в существование такого невидимого вещества, надо представлять себе, из чего оно состоит. И тут-то приходит на помощь невидимое нейтрино. Проблема «скрытой массы» решается, если нейтрино имеет достаточно большую массу покоя.

По современной космологической модели среднее число нейтрино всех типов в единице объема пространства в космосе должно быть сравнимо с числом фотонов в нем, то есть, как говорилось выше, составлять несколько сотен на кубический сантиметр. Если результаты опытов ИТЭФ по измерению массы покоя нейтрино подтвердятся и окажется, что у нейтрино масса покоя равняется десяткам электронвольт, то средняя

плотность нейтрино в космосе как раз и составит критическую величину, а масса всех нейтрино объяснит «скрытую» массу галактик. Вселенная в этом случае окажется замкнутой — начнет со временем сжиматься.

Так проблемы микро- и макромира оказались тесно связанными. Самое маленькое определяет жизнь самого большого — судьбу Вселенной!

Источники нейтрино во Вселенной

В течение столетий единственным источником информации о Вселенной был свет. Появление, помимо оптической астрономии, радио-, а затем рентгеновской и гамма-астрономии привело к открытию новых типов космических объектов — радиогалактик, квазаров, пульсаров, часто невидимых в оптическом диапазоне электромагнитных волн.

Обнаружение их было неожиданностью. Существование таких объектов не предсказывалось теоретическими работами. Достаточно, оказалось, перейти к измерениям на новом участке спектра электромагнитного излучения, чтобы резко расширить представления о строении Вселенной.

Но существует и другая форма заполняющего космос излучения и несущего информацию об астрофизических процессах в нем — это нейтрино. Его взаимодействие с веществом настолько слабое, что на пути от космических тел до Земли нейтрино практически не поглощается. Нейтрино могут вылетать из звездных недр, неся информацию о разыгрывающихся там физических процессах.

Источником космических нейтрино должны быть галактики, а именно реакции с участием протонов высоких энергий космического излучения и вещества галактик. Интенсивным точечным источником нейтрино должен быть взрыв Сверхновой, сколлапсировавшей под действием тяготения звезды. Полагают, что такие взрывы происходят в каждой галактике в среднем несколько раз в столетие.

Естественно считать, что в мощных космических радиоисточниках, квазарах, часть энергетического бюджета физических процессов идет на образование релятивистских частиц, а значит, и нейтрино.

Нейтрино космического происхождения — это ценней-

ший источник информации о составе космических тел и характере физических процессов в них.

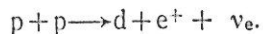
Интенсивным источником нейтрино является и земная атмосфера. Прилетающие из космоса частицы космических лучей высокой энергии, основная часть которых, как уже было сказано, — протоны, рождают при соударениях с атомами азота и кислорода воздуха π - и K -мезоны. Распадаясь, они дают потоки нейтрино и мюонов.

Источником нейтрино с энергией до 14 мегаэлектронвольт являются ядерные реакции в недрах звезд и Солнца. Рожденные в центре звезд нейтрино беспрепятственно проходят через их толщу, неся информацию об этих реакциях и условиях их протекания. Наибольший поток таких нейтрино доходит до Земли от Солнца.

Нейтрино от Солнца

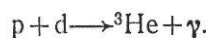
По современным теоретическим представлениям, Солнце находится в газообразном плазменном состоянии. 75 процентов его вещества составляют протоны, 25 процентов — гелий и лишь долю процента — тяжелые элементы. Положительный заряд этих частиц компенсируется электронами.

Темп жизни Солнца, скорость выделения энергии в нем задаются синтезом ядер дейтерия в реакции слияния двух протонов с одновременным образованием позитрона и нейтрино с энергией до 400 тысяч электронвольт:



Вероятность реакции, как и всех реакций с участием нейтрино, очень мала, и ее величину пока не удалось измерить в лабораторных опытах, но могут вычислить с хорошей точностью.

Образовавшиеся в веществе Солнца дейтроны относительно быстро сливаются с протонами и образуют ядра гелия-3 и гамма-квант:

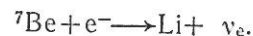


Здесь энергия гамма-кванта равна нескольким мегаэлектронвольтам. Однако при прохождении через массу Солнца кванты рассеиваются, теряют энергию и выхо-

дят на его поверхность в виде светового и теплового излучения. Нейтрино легко преодолевают такую мощную преграду, как масса Солнца, практически не поглощаясь и не рассеиваясь. Этот термоядерный водородно-водородный цикл продолжается по двум направлениям.

С наибольшей вероятностью идет слияние ядер гелия-3 с образованием гелия-4 и двух протонов с энергией 13 мегаэлектронвольт.

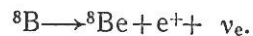
Вторая ветвь синтеза — сгорание естественно синтезированного гелия-4 и гелия-3 с выделением гамма-кванта с энергией 1,6 мегаэлектронвольта и образованием ядра бериллия-7. В реакцию с ядрами бериллия-7 вступают электроны, в результате чего появляются ядра лития-7 и выделяются нейтрино с энергией 0,86 мегаэлектронвольта:



Затем ядра лития-7 сливаются с протонами; эта реакция дает два ядра гелия-4 с кинетической энергией 17 мегаэлектронвольт, приводящей к дальнейшему разогреву массы светила.

Наряду с этим процессом, но с вероятностью в 1000 раз меньшей, происходит также слияние ядер бериллия-7 с протонами и образование нестабильного ядра бора-8 (оно тут же переходит в ядро бериллия-8). Реакция сопровождается выделением гамма-квантов с энергией 0,1 мегаэлектронвольта.

А при превращении бора-8 в ядро бериллия-8 рождаются позитрон и нейтрино (энергия нейтрино — до 14 мегаэлектронвольт):



Однако ядро бериллия-8 живет недолго и распадается на два ядра гелия-4.

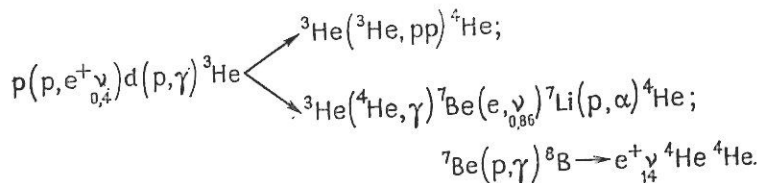
Мы видим Солнце светящимся потому, что в его недрах реализуются все три ветви водородно-водородного цикла (его иногда называют водородно-гелиевым циклом). Так происходит сгорание вещества Солнца и превращение в нем водорода в гелий.

Все названные реакции синтеза можно свести вместе в единой компактной записи. Поместим начальные и конечные частицы в реакции в скобках, отделив их запятой, а одну из конечных частиц — после скобки. Интересующие нас ниже значения энергии нейтрино напишем

под знаком нейтрино. Например, реакция цикла с испусканием нейтрино с энергией 0,4 мегаэлектронвольта выглядит так:

$$p(p, e^+ \nu_{0,4}) d.$$

Тогда все ветви водородно-водородного цикла можно записать в виде:



На этом водородно-гелиевый цикл обрывается, так как слияние ядер гелия-4 с протонами образует нестабильные ядра лития-5, мгновенно распадающиеся на ядра гелия-4 и протон.

Суммарный поток солнечных нейтрино оценивается величиной $7 \cdot 10^{10}$ частиц в секунду на каждый квадратный сантиметр поверхности Земли.

Установлено, что хлораргоновым методом нейтрино первой ветви водородно-гелиевого цикла не детектируются из-за порогового характера реакции превращения ядра хлора в аргон (порог по энергии нейтрино равен 0,81 мегаэлектронвольта).

Теоретически высчитано: число нейтрино от второй ветви составляет $3 \cdot 10^9$ частиц и от третьей — $3 \cdot 10^6$ частиц на квадратный сантиметр в секунду. Однако из-за большой энергии нейтрино третьей ветви хлораргоновая реакция идет с наибольшей скоростью именно под их действием (80 процентов всех зарегистрированных случаев превращения хлора в аргон).

Существенно отметить, что поток нейтрино сильно зависит от состояния вещества в центральной части Солнца и его температуры. Так, при изменении температуры с 12 до 14 миллионов градусов поток нейтрино от третьей ветви синтеза увеличивается на порядок. Поэтому измерение потока высокоэнергетических нейтрино от этого цикла позволит судить о температуре в центре светила. Если в оптическом телескопе виден весь диск Солнца, то в нейтринном телескопе будет «видна» только его внутренняя часть, в которой идут термоядер-

ные реакции. Одновременное измерение интенсивности и спектра электромагнитного излучения в рентгеновском, ультрафиолетовом, оптическом и радиодиапазоне, а также космических лучей и нейтрино позволит с достоверностью судить о процессах, протекающих на поверхности и в недрах Солнца на разных глубинах.

Малая вероятность взаимодействия нейтрино с веществом, дающая ему возможность без помех пролетать большие расстояния, чрезвычайно затрудняет детектирование этой неуловимой частицы. Ведь почти все прилетающие на Землю нейтрино проходят сквозь нее, не оставляя следа. Зарегистрировать удастся лишь единичные нейтрино, и то косвенно — по заряженным частицам, образовавшимся от попадания нейтрино в ядра. Для этого приходится использовать сотни тонн вещества детектора и надежно экранировать его от фона космического излучения другой природы, а также естественного излучения земных пород.

Поток нейтрино от Солнца измеряется в солнечных единицах нейтрино — СЕН. Такой единице отвечает захват одного нейтрино в секунду количеством хлора в 10^{36} атомов. По теоретическим моделям протекания физических процессов на Солнце поток нейтрино от него при использовании хлораргонового метода должен равняться 7 СЕН.

С 1967 года в Брукхэйвенской национальной лаборатории проводится «улавливание» солнечных нейтрино. Для этого создана нейтринная обсерватория: 600 тонн жидкого перхлорэтилена в цилиндрической баке диаметром 6 метров и длиной 15 метров вот уже около 20 лет находятся на глубине 1,5 километра под землей, в старой шахте в штате Южная Дакота.

Результаты измерений оказались сенсационными. Средний поток нейтрино был в 3 раза меньше ожидаемого, составляя около 2 СЕН. В год в среднем регистрируется до 200 соударений нейтрино с веществом. В чем причина разногласия с теоретическими представлениями, неясно. Попытки дать этому объяснение путем перестройки физической модели процессов на Солнце, уменьшив поток нейтрино третьей ветви водородно-водородного цикла, то есть снизив температуру, к существенному результату не привели. Тем не менее такие попытки продолжаются. Рассматривается несколько гипотез. Согласно одной из них термоядерная «печь» на

Солнце, возможно, периодически затухает. Этот процесс представляется таким образом.

Когда «печь» работает, в ней в результате термоядерного синтеза происходит разогрев, повышение внутреннего давления и расталкивание вещества, что приводит к уменьшению его плотности в Солнце и снижению скорости реакций. Тогда-то «печь» и затухает. Но затем все начинается сначала. С потерей энергии на излучение начинают преобладать силы гравитации, сжимающие вещество Солнца, происходит его разогрев и новое возбуждение синтеза. На общей светимости Солнца это заметно не скажется.

Именно такие циклы в миллионы лет могли вызывать периоды оледенения на Земле.

Некоторые физики полагают, что дело обстоит гораздо проще: мы не очень точно знаем, с какой вероятностью протекают в недрах Солнца элементарные реакции, в которых рождается нейтрино; возможно, что наши теоретические модели не отражают того, что в действительности происходит на Солнце.

Для решения этой проблемы в нескольких странах создаются детекторы, которые будут регистрировать нейтрино на основе реакций с более низким порогом, нежели при хлораргоновом методе. Например, реакция нейтрино на галлии с образованием германия и электрона имеет порог всего 0,23 мегаэлектронвольта, и нейтрино от всех гипотетических реакций на Солнце будут зарегистрированы с помощью этой реакции. Проведение такого опыта может оказаться решающим для проверки представлений о способе выделения солнечной энергии. Возможно, что на этом пути нас ждет открытие!

Обратим внимание на то, что в термоядерном синтезе образуются нейтрино, а не антинейтрино. Если бы звезда состояла из антивещества, то она излучала бы антинейтрино. Если удастся зарегистрировать антинейтрино от других галактик, то можно будет обнаружить галактики из антивещества.

Ожидаемый поток нейтрино от космических объектов на порядок меньше, чем от Солнца, но его можно попытаться зарегистрировать, измерив так называемую анизотропию потока нейтрино из космоса, то есть неоднородность этого потока по углу наблюдения.

Нейтринные обсерватории под землей и под водой

Первые небольшие установки для детектирования атмосферных нейтрино были созданы на глубине 3 километров в золотых шахтах индо-англо-японской группой физиков в Южной Индии и американскими физиками в Южной Африке.

В 1965 году природные нейтрино были зарегистрированы по следам, оставленным мюонами, возникшими в результате взаимодействия нейтрино с окружающими детекторы веществом горных пород.

С 1978 года в СССР начал наблюдения за природными нейтрино большой подземный сцинтилляционный телескоп нейтринной обсерватории Института ядерных исследований АН СССР (ИЯИ АН СССР) *. Он расположен, как уже говорилось, в Баксанском ущелье на Северном Кавказе на глубине 350 метров в подземной камере высотой и длиной 24 метра, шириной 16 метров.

Телескоп представляет собой четырехэтажное сооружение высотой 16 метров и площадью основания 180 квадратных метров. Он состоит из 4 вертикальных и горизонтальных плоскостей, покрытых сцинтилляционными детекторами. Каждый из них — это алюминиевый контейнер объемом $70 \times 70 \times 30$ кубических сантиметров, заполненный жидким сцинтиллятором, и фотоумножитель.

При соударении атмосферных нейтрино с окружающим детектор грунтом рождаются мю-мезоны. Проходя через сцинтиллятор, заряженный мюон вызывает свечение, которое и регистрируется фотоумножителями. Всего в телескопе 3200 детекторов, а полный их вес — 330 тонн. Большая масса нужна для увеличения вероятности взаимодействия нейтрино и детектирования с большей эффективностью мюонов.

Часть дошедших до телескопа мюонов рождается в атмосфере Земли протонами космических лучей с энергиями свыше 1000 гигаэлектронвольт. Эти мюоны движутся сверху. Другая часть мюонов появляется в окружающем телескоп грунте в результате проникновения в него нейтрино, образовавшихся в реакциях взаимодействия космических лучей с ядрами азота и кислорода воздуха. Эти нейтрино и вторичные мюоны приходят к

* См.: Большой подземный телескоп нейтринной обсерватории АН СССР.— Природа, 1978, № 4, с. 137.

телескопу со всех сторон. Снизу, из-под Земли, приходят только «нейтринные» мюоны. Детектор эффективно регистрирует мюоны с энергией свыше 1 гигаэлектронвольта. Направление прихода частиц определяется с точностью до 2 градусов. Через телескоп пролетает небольшое число высокоэнергетических мюонов в год, и зарегистрированных случаев пока недостаточно для обнаружения космических источников нейтрино.

Информация с детекторов поступает в расположенный рядом с телескопом аппаратный зал. Окончательная обработка данных производится в вычислительном центре, расположенном на поверхности.

Вторая советская нейтринная станция построена в соляных шахтах Карло-Либкнехтовска в Донбассе*. Здесь в нише, вырубленной на глубине 240 метров, в толще соляного пласта установлен нейтринный телескоп. Это цилиндр из нержавеющей стали объемом 120 кубических метров. Он заполнен 100 тоннами жидкости, которая светится при прохождении через нее заряженной частицы. 144 фотоумножителя фиксируют эту вспышку. «Электронный мозг» сообщает результаты.

Две советские станции стали частью Всемирной службы наблюдения за нейтрино. Частью той же службы является итальянская станция, оборудованная в туннеле под Монбланом. В ее создании принимали участие и советские специалисты. Еще одна станция для детектирования нейтринного всплеска гравитационного коллапса звезд находится в Южной Дакоте (США).

Астрофизический аспект физики нейтрино высоких энергий в полном объеме может быть реализован только с созданием детекторов еще больших масс.

С начала 70-х годов в СССР и США разрабатывается метод регистрации заряженных частиц с использованием глубоководных детекторов мюонов и нейтрино с массой детектирующего вещества в миллионы тонн.

По американскому проекту, выполняемому с участием японских и западногерманских физиков и получившему название ДЮМАНД (Deep Underwater Muon and Neutrino Detector — «Глубоководный мюон-нейтринный детектор»), предполагается поместить над дном океана на глубине 5 километров 36 гирлянд со световыми приемниками — фотоумножителями в прозрачных водоне-

проницаемых оболочках. На каждой такой гирлянде будет подвешено с интервалом 25 метров по 21 приемнику света. Гирлянды должны быть отделены одна от другой расстоянием в 50 метров так, чтобы получилось 6 вертикальных плоскостей. Объем пространства, который займут детекторы в воде, — до 30 миллионов кубометров.

Океаническая вода сама играет роль и детектора, и мишени. Проходящие через нее «атмосферные» быстрые мюоны или мюоны от реакции нейтрино с атомами воды вызовут черенковское свечение, а его, как мы уже знаем, могут регистрировать фотоумножители.

С наибольшей эффективностью улавливаются мюоны с энергией выше 100 гигаэлектронвольт. «Атмосферные» мюоны с энергией меньше 1000 гигаэлектронвольт вообще не доходят до детектора. Для регистрации мюонов меньших энергий, рожденных нейтрино в воде, будет установлена с интервалом 10 метров внутренняя группа счетчиков из 1000 приемников. Детекторы связываются гибкими кабелями с наземным компьютером, позволяющим рассчитать энергию и направление прилета мюонов. Глубоководные детекторы значительно чувствительнее наземных к высокоэнергетической части потока мюонов и нейтрино (из-за лучшей экранировки от фона и большего объема вещества детектора).

Помимо световых приемников, возможно использование и звуковых. Почти мгновенное выделение энергии вдоль траектории заряженной частицы вызовет образование микроскопической ударной волны, переходящей в звуковую. Расчеты показывают, что звуковой сигнал превысит шум в океане для нейтрино с энергией в миллионы гигаэлектронвольт.

Первая задача, которая будет решена с помощью глубоководных детекторов, — это изучение спектра высокоэнергетической компоненты космических лучей.

Конечно, сложно опустить в океан тысячи оптических и акустических приемников на глубину 5 километров, да еще сохранять их там в рабочем состоянии и передавать от них сигналы на десятки километров до наземного компьютера.

В течение нескольких лет проводилось изучение пригодных для осуществления проекта мест на дне океана и способов размещения аппаратуры. В результате были выбраны Гавайские острова. Они имеют вулканическое

* См.: Советская Россия, 1978, 3 июля.

происхождение и обладают крутыми склонами, что уменьшает длину кабеля от приемников до наземных служб, на дне океана здесь нет сильных течений, велика биологическая активность (относительно слабое свечение микроорганизмов), которая могла бы мешать работе светочувствительных приемников. Немаловажную роль сыграла и прозрачность воды в этой части океана.

Стоимость проекта — около 100 миллионов долларов.

Программа работ по созданию глубоководного детектора мюонов и нейтрино осуществляется также и в СССР, на Байкале, в том месте, где глубина его превышает километр.

Выбор места на Байкале определяется теми же соображениями, что и в американском проекте. Преимущества Байкала по сравнению с океаном — еще более низкая биологическая активность микроорганизмов, малая минерализация воды, что весьма существенно, — металл меньше подвергается коррозии, чем в воде океана.

Установка будет эффективно детектировать мюоны с энергией свыше 100 гигаэлектронвольт. Ожидается, что благодаря большой массе глубоководные детекторы смогут регистрировать в 1000 раз больше случаев реакций нейтрино с образованием высокоэнергетических мюонов, нежели наземные детекторы.

С созданием глубоководных детекторов нейтринная астрономия вступит в пору зрелости.

ГЛАВА 11. В ПОИСКАХ ГРАВИТОНА

Мысль о том, что способность возбуждать тяготение могла бы быть неотъемлемым, внутренне присущим свойством материи и что одно тело могло бы воздействовать на другое через пустоту на расстоянии, без участия чего-то такого, что переносило бы действие и силу от одного к другому, — представляется мне столь нелепой, что нет, как я полагаю, человека, способного мыслить по-философски, кому она пришла бы в голову.

И. Ньютон

Электромагнитные волны — пример волнового процесса

Физика твердо установила, что воздействие одного микроскопического тела на другое осуществляется при

их соприкосновении либо посредством поля. В микромире частицы взаимодействуют только посредством поля. Согласно квантовой теории это поле квантовано, то есть состоит из микрочастиц. Поиск квантов гравитационного поля (гравитационных волн или соответствующих частиц — гравитонов) — это один из интригующих эпизодов в развитии современного естествознания.

Как рождаются и распространяются в пространстве гравитационные волны? Как их можно детектировать и что они могут нам сказать о Вселенной?

Чтобы это понять, обратимся к электромагнитным волнам, более или менее изученным. Можно сказать так: физики не испытывали больших психологических трудностей, когда пытались понять, как действуют электрические и магнитные силы между телами. Такие трудности возникли, когда обнаружилось, что эти силы могут переходить в волновое движение, покидать вашу лабораторию и улетать в пространство как независимый объект — что-то вроде улыбки чеширского кота из сказки Л. Кэрролла «Алиса в стране чудес». Звуковые волны и волны на поверхности воды не кажутся столь замечательными, так как можно увидеть или зарегистрировать колебания среды, через которую они проходят. Электромагнитное излучение, как и тепловое и световое, распространяется независимо от среды. Например, от Солнца оно приходит к нам через безвоздушное пространство за 150 миллионов километров.

Объяснение этому дает электромагнитная теория Максвелла, объединившая электрические и магнитные явления. То, что электрические и магнитные поля — близкие родственники, иллюстрируется таким примером.

Рассмотрим движение электронов. Наблюдатель в лаборатории измеряет поток (ток) электронов и порождает им магнитное поле. Теперь представьте себе, что лаборатория вместе с наблюдателем движется с электронным потоком с его скоростью. Изменится ли что-нибудь? Да, изменится, притом весьма существенно. Прежде всего наблюдатель не увидит тока, а значит, исчезнет и магнитное поле. Он будет иметь дело только с совокупностью неподвижных электронов, которые порождают электростатическое кулоновское поле, то есть поле, в котором взаимодействуют между собой точечные электрические заряды в зависимости от их знаков и рас-

стояний между ними: одноименные отталкиваются, разноименные притягиваются. Это поле не характеризуется векторами напряженности \vec{E} и \vec{H} электромагнитного поля, а только электростатическим потенциалом — простым числом.

Из этого примера видно, что не всегда можно отличить электрический ток и магнитное поле от простого кулоновского поля зарядов. Электрические и магнитные свойства в отдельности зависят от движения изучаемого их субъекта, и только их объединение в виде единого электромагнитного поля (это и сделал Максвелл) является объективной реальностью.

Теория Максвелла показывает, что изменяющийся ток является причиной образования вокруг него переменного магнитного поля, которое в свою очередь порождает переменный же электрический ток и переменное электрическое поле. Получается, что каждое переменное электрическое и магнитное поле становится источником другого. Поэтому, раз возникнув, они могут существовать и без источника — электрического заряда или тока, оторваться от излучающей антенны и распространяться как через среду, так и через вакуум.

До Максвелла это было неизвестно.

Но и Максвелл не смог всего объяснить. Если электрические и магнитные явления одной природы, то между ними могла бы существовать полная симметрия. В действительности же такой полной симметрии не наблюдается: электрический заряд есть, а вот магнитного заряда нет*.

Простое решение уравнений Максвелла для векторов напряженностей электрического и магнитного поля, отражающее возможность самостоятельного физического существования электромагнитного поля, имеет вид синусоидальной волны, движущейся со скоростью света. Это навело Максвелла на мысль, что и свет — это электромагнитная волна. Так теория электромагнитного поля объединила в нескольких уравнениях Максвелла электричество, магнетизм и оптические явления.

* Физикам примириться с таким положением трудно, и они все время пытаются найти из него выход. Так, П. Дирак выдвинул дерзкую идею, согласно которой магнитный заряд существует в природе в виде элементарной частицы с одним магнитным полюсом — в виде монополя. Однако такая частица в природе пока не найдена.

Электромагнитные волны несут энергию, импульс и действуют с определенной силой на материю, с которой сталкиваются, что, как уже отмечалось, доказал великий русский физик П. Н. Лебедев. В пользу этого говорит и ряд астрономических наблюдений. В частности, хвосты комет, состоящие из газа, буквально развеваются под давлением света.

Из уравнений Максвелла видно, что колебания векторов напряженности \vec{E} и \vec{H} электрического и магнитного полей происходят в плоскости, перпендикулярной направлению движения волны, а сами эти векторы остаются всегда перпендикулярными один другому (говорят, что колебания в электромагнитной волне поперечные). В общем случае в электромагнитной волне векторы \vec{E} и \vec{H} вращаются с частотой волны вокруг направления ее распространения.

Встает вопрос, а как рождаются самостоятельно существующие электромагнитные волны? Раз образовавшись, они распространяются подобно волнам от брошенного в воду камня. Но что играет роль камня в случае электромагнитного излучения?

Образование электромагнитной волны током электронов можно понять, изучив поведение при движении заряда расходящихся радиально от него силовых линий поля (вдоль них направлена действующая на пробный заряд кулоновская сила). Сместим резко заряд. Через время t поле внутри области радиусом $r=ct$ (где c — скорость распространения электромагнитной волны) будет иметь радиальное направление уже от нового положения заряда. Вне этой области из-за конечности скорости распространения возмущения (электромагнитной волны) силовые линии поля будут еще направлены от прежнего центра. Поэтому на границе этих двух областей на расстоянии $r=ct$ возникает возмущение, которое стремится вернуть силовые линии в направлении к новому центру.

Такое же смещение заряда в обратную сторону приведет к возмущению силовых линий и их смещению в противоположную сторону, а вызываемое переменным электрическим полем периодическое колебание заряда — к периодическим колебаниям силовых линий поля такой же частоты. Эти колебания в каждый момент вре-

мени t находятся на расстоянии $r = ct$ от заряда, то есть распространяются в пространстве.

На достаточно большом расстоянии от заряда колебания перпендикулярны силовым линиям. Этим обуславливается поперечность колебаний векторов напряженности поля в электромагнитной волне.

Простейший электромагнитный излучатель — это электрический диполь, то есть два синхронно колеблющихся заряда противоположных знаков.

О тяготении и гравитационных волнах

Введенное впервые великим Фарадеем понятие поля обладает тем важным свойством, что взаимодействие между отдельными зарядами объясняется не действием на расстоянии, а посредством влияния поля в каждой точке пространства на заряды. Это концепция близкодействия, легшая в основу современных физических представлений о взаимодействии элементарных частиц. Любое взаимодействие объясняется обменом квантами поля, которые несут информацию о существовании одного тела другому.

Концепция близкодействия объясняет явление тяготения существованием гравитационного поля, квантов поля (гравитонов) и распространяющихся гравитационных волн. Виртуальный гравитон сперва испускается в одной точке пространства телом, а затем поглощается в другой точке пространства другим телом. В этом и вся суть взаимодействия через близкодействие. Если отказаться от таких представлений, то станет неясно, откуда одно взаимодействующее тело «знает» о существовании другого тела. Где в таком случае материальный носитель информации? Поэтому существование гравитона — необходимое следствие явления тяготения.

Гравитация имеет много общего с электромагнетизмом. Силовые линии поля тяготения идут радиально от тела, как и силовые линии электромагнитного поля, а роль электрического заряда играет масса тела. Образование гравитационного излучения связано также с изломом силовой линии, и распространяется это излучение в виде гравитационной волны. Предполагается, что и гравитационное излучение распространяется со скоростью света, хотя не исключается и меньшая скорость. Волны гравитационного поля, как и электромагнитного, поперечные.

Принципиальное отличие гравитационного взаимодействия от электромагнитного состоит в том, что масса имеет всегда один знак (электрический же заряд может быть положительным, отрицательным, либо отсутствовать вовсе) и гравитационно «незаряженных» тел не существует. Иными словами, все тела, имеющие массу, взаимодействуют между собой через тяготение.

Все тела падают под действием тяготения с одинаковым ускорением (факт, установленный еще Галилеем). Действующую на малое тело силу тяготения можно скомпенсировать выбором ускоренной системы отсчета, а определяющая ускоренное движение инертная масса равна тяготеющей массе, присутствующей в законе тяготения Ньютона. Это — принцип эквивалентности (равенства) тяготеющей и инертной масс. Поясним его примером.

Если мы находимся в неподвижном лифте, на нас действует сила тяжести. Но в падающем с ускорением свободного падения лифте мы уже не ощутим силу тяжести.

Состояние свободного падения привычно и для космонавтов при орбитальном полете в «свободно падающем» корабле. В ускоренной системе отсчета, движущейся со спутником, сила тяжести скомпенсировалась. В этой системе отсчета уже нельзя физическими измерениями обнаружить существование поля тяготения.

Движение Земли вокруг Солнца тоже представляет собой свободное падение. И хотя сила тяготения Солнца на поверхности Земли составляет целую десятую долю процента от земного тяготения, но на весе тел не сказывается совершенно. Он определяется только силой тяготения Земли. Тот же результат был бы для тел и на поверхности Меркурия, где сила тяготения Солнца составляет уже 1 процент силы тяжести, обусловленной массой Меркурия. В обоих случаях возможное влияние тяготения Солнца на вес тел полностью скомпенсировалось свободным падением планет в поле тяжести Солнца при их движении по орбитам.

Неподвижное или движущееся ускоренно тело не может стать источником гравитационных волн, так как можно выбрать систему отсчета, в которой поля тяготения просто нет. Это важнейшее следствие принципиального отличия гравитационного «заряда» — массы от электрического заряда. Если бы силу тяжести можно

было во всем пространстве скомпенсировать выбором ускоренной системы отсчета, то гравитационные волны вообще не возникали бы. Однако оказывается, что если действие тяготения на тело достаточно малого размера можно скомпенсировать выбором ускоренной системы отсчета, то этого нельзя сделать для тел большего размера. Здесь «малое» означает, что размер тела мал по сравнению с размерами, на которых сказывается неоднородность поля тяготения.

Сила тяготения обладает приливным свойством, которое обусловлено существованием разности гравитационного поля в точках тела, различно удаленных от источника поля. Поэтому, например, Луна притягивает сильнее ту сторону Земли, которая обращена к Луне. Разница сил определяется отношением диаметра Земли к расстоянию ее до Луны, то есть отношением 13 тысяч километров к 300 тысячам километров. Это ни много ни мало, а целых 4 процента! Воды океана притягиваются на обращенной к Луне стороне Земли значительно сильнее, чем на «боковых» сторонах Земли. Океан вспучивается. Твердая континентальная часть Земли слабо деформируется под действием силы тяготения Луны: все материи притягиваются с той же силой, что и центр Земли. Вода же океана на поверхности легко деформируется. На той стороне Земли, которая противоположна Луне, вода притягивается слабее, нежели материк, и здесь тоже возбуждается прилив. Океанические приливы происходят одновременно и на той стороне Земли, что обращена к Луне, и на другой, противоположной. То же самое относится и к отливам на «боковых» сторонах Земли. Два раза в сутки чередуются приливы и отливы океана.

Интересно, что хотя Солнце в 180 раз сильнее притягивает к себе Землю, чем Луна, оно тем не менее не создает приливов и отливов. Естественно, возникает вопрос: почему? Ответ довольно простой. Тут сказывается разница в расстояниях между Землей и Луной и Землей и Солнцем. Земля так удалена от Солнца, что сила его тяготения распределяется по планете практически равномерно (если и есть различие в тяготении в различных точках, то оно составляет лишь сотые доли процента).

Приливной характер гравитационных сил проявляется в том, что для протекания физических процессов на

свободно падающем теле существенна не величина поля, а ее вариации в пределах рассматриваемого пространства.

Рассмотрим другой пример приливного характера сил тяготения. Допустим, что два подвешенных на нитях шарика спускаются в лифте со скоростью свободного падения. Каждый из шариков падает вертикально по оси, соединяющей его с центром Земли. Их пути движения не параллельны, а сходятся в центре Земли. Поэтому между шариками действует дополнительная сила притяжения, обусловленная не их взаимным тяготением, а действием внешнего для них поля Земли. Находящийся в лифте наблюдатель сможет измерить эту силу. Если рассматривать конечные, соизмеримые с размерами неоднородности гравитационного поля пространства, то гравитация оказывается не эквивалентной ускорению. Если, например, в таком лифте свободно падает легко деформирующийся во всех направлениях шарик (скажем, капля воды), то его будет вытягивать по вертикали и сжимать по горизонтали сила тяготения. Она вызовет деформацию шарика.

Пример с лифтом показывает, что в неоднородном гравитационном поле на все точки свободно падающего тела действует сила, вызывающая их смещение — деформацию тела. Коэффициент пропорциональности между векторами смещения точки и такой силой введен Эйнштейном и носит название тензора гравитационного поля.

В однородном поле тяготения тензор гравитационного поля равен нулю, что соответствует возможности выбора системы отсчета, свободно падающей вместе с телом. Поле в такой системе компенсировано. Этого нельзя сделать в неоднородном поле тяготения, каким вообще и бывают все гравитационные поля. Только на очень большом расстоянии от источника гравитации поле можно рассматривать условно однородным.

В своей общей теории относительности Эйнштейн предложил уравнение для тензора гравитационного поля, исходя из четырехмерности физического пространства-времени. В этом уравнении Эйнштейн реализовал выдвинутое австрийским физиком Э. Махом положение об определяющем влиянии материи на свойства окружающего пространства.

Какая же связь существует между гравитационным полем, пространством и материей?

Гравитационное поле, пространство и время

Согласно теории относительности как физическая реальность существует только четырехмерное пространство-время. Движение в нем при наличии тяготения рассматривается как свободное, если принять, что оно происходит по линии, называемой геодезической. Геодезическая линия соединяет кратчайшим путем две точки в пространстве, в котором движется тело. Например, на сфере геодезические линии — это дуги большого круга.

Соседние геодезические линии могут в зависимости от свойств пространства сходиться или расходиться, воспроизводя эффект приливных сил в неоднородном поле тяготения. На сфере геодезические линии — меридианы — расходятся на экваторе и сходятся в полюсах. Пространство, в котором геодезические линии прямые, называется плоским, а если нет — то кривым.

Проиллюстрируем на примерах возможность представления движения в гравитационном поле свободным движением по геодезической линии в кривом пространстве.

Пусть два спутника в Северном полушарии летят на близко расположенных меридианах точно на север, в направлении на Полярную звезду. Космонавтам в спутниках кажется, что они летят параллельно, но каждый из них движется под действием тяготения, свободно падая. Из-за кривизны Земли пути спутников, движущихся в действительности по меридианам, пересекутся над Северным полюсом. И это при параллельном движении на север! Существование поля тяготения проявилось просто в кривизне поверхности Земли, а в явном виде не присутствовало. Тот же результат получим, если будем рассматривать движение спутников в плоском пространстве, но под действием силы притяжения Земли.

Пусть самолет летит из Москвы к лежащему на той же параллели Петропавловску-на-Камчатке. Оказывается, что из-за кривизны поверхности кратчайшее расстояние между ними не параллель, а геодезическая линия — дуга большого круга сферы Земли, на которой лежат эти два города. Кратчайший маршрут проходит по северной оконечности Азии. Самолет должен сперва полететь на северо-восток, а после середины пути уже на юго-восток.

Кривизна сферы определяется одним числом — величиной ее радиуса. Эйнштейн предположил, что кривизна любого самого «кривого» пространства полностью характеризуется тензором гравитационного поля R . Затем, опираясь на идею, высказанную Махом, Эйнштейн пришел к выводу, что этот тензор связан простейшим образом с энергией и импульсом движущихся в пространстве тел, и вывел свое знаменитое уравнение теории тяготения:

$$R = -\frac{\delta\pi}{c^2} GT,$$

где T — некоторая комбинация из энергии и импульса тел, называемая тензором энергии-импульса; G — постоянная тяготения Ньютона; c — скорость света в вакууме.

Таким образом, в левой части этого гениального простого с виду уравнения стоит величина, определяющая геометрию пространства-времени, а в правой — определяющая материю.

Несмотря на кажущуюся простоту этого уравнения, оно является предметом исследования не одного поколения физиков, найдены отдельные его решения, отвечающие частному распределению масс в пространстве. Много информации еще будет извлечено из этого уравнения.

Согласно Эйнштейну тяготение определяется не массой покоя тела, как в теории Ньютона, а релятивистской массой. Теория гравитации Эйнштейна — это обобщение теории Ньютона на случай релятивистских скоростей. Добавим, что уравнение Эйнштейна точно только для слабых гравитационных полей, обобщение для сильных полей пока неизвестно.

Несколько слов скажем еще о том, как измеряют кривизну пространства. Мерой кривизны поверхности принято считать отклонение полной длины окружности с радиусом r на этой поверхности от величины $2\pi r$. Если длина окружности меньше, чем $2\pi r$, то кривизна поверхности называется положительной. Пример — сфера. Если же длина окружности больше, чем $2\pi r$, то кривизна такой поверхности отрицательна. Пример — поверхность седла. И лишь при длине окружности, точно равной $2\pi r$, эта поверхность плоская. Ее кривизна нулевая.

Этот способ вычисления кривизны легко распространяется на пространство большего числа измерений. Кри-

визна трехмерного пространства определяется отклонением площади поверхности с точками, удаленными от некоторого центра в пространстве на расстояние r , от величины $4\pi r^2$ — площади поверхности сферы в плоском пространстве.

Является ли мир, в котором мы живем, плоским? Или он имеет кривизну? Это зависит от плотности вещества и суммарной массы Вселенной. Если они превышают критическое значение, о котором мы говорили ранее, то четырехмерное пространство-время имеет положительную кривизну, если нет — отрицательную.

Интересное свойство трехмерного пространства с отрицательной кривизной: в нем сумма углов треугольника меньше 180 градусов. Отклонение ее от этой величины пропорционально площади треугольника и является мерой кривизны. Только у треугольника с малыми сторонами сумма углов близка к 180 градусам, а у треугольника с бесконечно большими сторонами она вообще стремится к нулю. В таком пространстве через точку проходит много прямых, параллельных заданной прямой, но угол между ними конечный и может быть очень малым. По его величине также можно судить о кривизне пространства. Для нашего трехмерного пространства он, во всяком случае, меньше величины параллакса самой удаленной звезды (параллакс — это угловое расстояние между направлениями, под которыми видна звезда из противоположных точек солнечной орбиты Земли). Эта величина не превышает для удаленной звезды погрешности астрономической аппаратуры в измерении углов — сотых долей угловой секунды.

Впервые измерение параллакса звезд для оценки кривизны нашего пространства применил русский математик Н. И. Лобачевский. Вопрос о кривизне пространства не решен до сих пор.

Согласно уравнению Эйнштейна поле тяготения Солнца искривляет окружающее пространство-время. Поэтому движение Меркурия вокруг Солнца происходит не по замкнутой эллиптической орбите, а по близкой к ней кривой, у которой ближайшая к Солнцу точка орбиты — перигелий — смещается ежегодно в направлении годового обращения Меркурия на 43 угловые секунды. Это самый значительный по величине наблюдаемый эффект, предсказанный общей теорией относительности (теорией тяготения) Эйнштейна.

Другой эффект: свет от звезды, проходя по геодезической траектории вблизи Солнца, отклоняется от прямой под действием мощного поля гравитации Солнца. Эффект отклонения луча света от прямой еще меньше, чем смещение перигелия Меркурия. Его отклонение не превышает 1,75 угловой секунды. Днем звезду увидеть нельзя. Однако при полном солнечном затмении, когда Луна закрывает диск светила, звезды становятся на несколько минут видимыми. Если сравнить фотографии звезд, оказавшихся недалеко от Солнца (на фотографии, но не в мировом пространстве) во время полного затмения, с фотографиями той же части неба, снятыми за несколько месяцев до затмения, когда Солнце находилось среди других созвездий, в руках астрономов окажутся данные по смещению видимого положения звезды из-за отклонения света в поле тяготения Солнца.

После предсказания Эйнштейном этого эффекта была запланирована первая его проверка во время солнечного затмения 29 мая 1919 года. Тогда Королевское общество Англии (аналог академии наук) снарядило две экспедиции: одну — в Бразилию, а другую — на западное побережье Африки. Африканская экспедиция, возглавляемая английским астрономом А. Эддингтоном, подтвердила предсказание общей теории относительности.

Современные опыты по проверке теории относительности

В 1960-х годах были открыты новые астрономические объекты, названные квазарами. Для них характерно интенсивное квазимонохроматическое радиоизлучение. Это подсадало астрономам идею наблюдения отклонения радиолуча квазара в поле тяготения Солнца. Так как Солнце в радиодиапазоне светит слабо, то радиоастрономам не нужно дожидаться солнечного затмения в каком-нибудь забытом богом уголке земного шара. Наблюдения можно проводить на приборах радиоастрономической обсерватории. С помощью радиоинтерферометров со сверхдлинной базой можно получать значительно лучшие угловые разрешения, чем те, которые дает на поверхности Земли обычная оптическая техника наблюдения.

Ежегодно 8 октября Солнце при своем видимом движении по небу проходит мимо квазара 3С273 в созвездии Девы. Теория относительности требует, чтобы в этот

момент радиоволны от квазара отклонялись точно таким же образом, как и свет от звезд. В начале 70-х годов радиоастрономы провели ряд наблюдений отклонения радиоволн Солнцем. В октябре 1972 года измерялось угловое расстояние между квазарами 3С273 и 3С279, находящимися вне Галактики. Использовались 4 радиоантенны, по 2 в национальных радиоастрономических обсерваториях в штате Западная Вирджиния и в штате Массачусетс, отстоящих одна от другой на расстоянии 845 километров. Полученное с помощью интерферометра с такой большой базой угловое разрешение составляло примерно одну сотую угловой секунды. Излучение принималось на длине волны 4 сантиметра. Когда Солнце сближалось на небосводе с квазаром 3С273, то угловое расстояние на небе между квазарами менялось на величину, с высокой точностью согласующуюся с общей теорией относительности. В 1974 и 1975 годах проводились аналогичные по постановке опыты, подтвердившие эффект с большой точностью.

Третий эффект, предсказанный общей теорией относительности,—замедление скорости движения фотонов в поле тяготения. Если свет от излучения атомов проходит в неоднородном поле тяготения, то из-за искривленности пространства-времени происходит смещение частоты света в меньшую сторону (красное смещение). Этот эффект слабее, чем предыдущие, но все равно хорошо регистрируется современными приборами.

Для проверки этого эффекта была поставлена серия опытов. Наверху башни высотой 25 метров помещали кристаллический излучатель из железа-57, внизу башни — кристалл-поглотитель из такого же изотопа железа. Регистрация смещения частоты света осуществлялась на основе использования так называемого эффекта Мёсбауэра — явления, открытого немецким физиком Р. Мёсбауэром в 1958 году при изучении резонансного поглощения и рассеяния гамма-квантов. Эта серия опытов полностью подтвердила предсказание общей теории относительности: наблюдалось такое красное смещение частоты гамма-излучения, какое и должно было быть согласно теории.

Уменьшение скорости света в сильном поле тяготения приводит также к запаздыванию радиосигналов при прохождении их вблизи Солнца. Эффект впервые подтвердился в опытах 1963 года по радиолокации Венеры.

При прохождении радиолокационного луча от Земли к Венере и обратно близко к Солнцу время запаздывания составило две десятитысячные секунды в точном соответствии с теорией. В этом эксперименте мощность сигнала в импульсе равнялась 300 киловаттам, а мощность отраженного сигнала — всего миллиардной доле миллиардной части милливатта, но сигнал был уверенно зарегистрирован. Таковы точность и чувствительность современных физических измерений!

В середине 70-х годов удалось провести еще более точную проверку эффекта запаздывания радиосигнала путем радиослежения за космическими аппаратами «Маринер» и «Викинг» на гелиоцентрической орбите. Достигнутое здесь временное разрешение позволяет определять расстояние между точками на Марсе и Земле с погрешностью всего 2 метра! Это своеобразный мировой рекорд, достойный включения в книгу рекордов науки.

Опыты опять подтвердили теорию.

Эффект замедления хода часов в поле тяготения Земли удалось измерить в 1977 году в опытах физиков из Мэрилендского университета в США. В одном из экспериментов устанавливались чрезвычайно точные атомные цезиевые часы в самолете, в то время как другие такие же часы оставались на Земле. Лазерные сигналы посылались с Земли и отражались от кубических уголкового отражателя на летящем самолете, реализуя тем самым на практике эйнштейновский мысленный эксперимент по синхронизации пространственно разделенных часов обменом световых сигналов. Путь летевшего на высоте 10 километров самолета строго контролировался. Используя в опыте цезиевые часы имели погрешность хода в одну триллионную долю процента за 30 часов, в течение которых продолжался эксперимент. После каждого из двух 15-часовых полетов находившиеся в самолете часы ушли вперед на 47 миллиардных долей секунды. Этот результат получается как разность ускорения часов на 52 наносекунды из-за движения самолета на большой высоте и потому в более слабом поле тяготения, чем на поверхности Земли, и замедления часов на 5 наносекунд из-за их движения по отношению к неподвижным часам в соответствии со специальной теорией относительности.

Экспериментальное подтверждение общей теории от-

носительности заставляет поверить и в существование предсказываемых ею гравитационных волн и квантов гравитации. Однако необходимость их следует и из более фундаментальных представлений о близкодействии между телами, которое составляет основу квантовой физики.

Источники гравитационных волн в природе

Поскольку гравитационные волны поперечные, на вещество они могут оказывать силовое воздействие — давить в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения. Под таким воздействием вещество будет одновременно сжиматься и растягиваться по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Если на пути волны окажется горизонтально расположенный металлический цилиндр так, чтобы волна двигалась вдоль его оси, то цилиндр примет форму эллипса, вытягивающегося попеременно то в вертикальном, то в горизонтальном направлении. К сожалению, эти колебания будут очень слабыми, и их трудно поймать, зарегистрировать. Если же волна распространится перпендикулярно оси цилиндра, то «дышать» станут его торцы. Чем тело протяженнее, тем больше действующая на его концы сила. И наоборот. Причиной образования гравитационных волн является деформация тел.

Но колебания поверхностей тел на Земле не дают сколько-нибудь заметного гравитационного излучения. Гравитационные волны идут от столкновений космических тел, взрывов звезд. Сжатие (коллапс) звезды или поглощение материи «черной дырой» способны сопровождаться импульсом гравитационного излучения. По расчетам во время этих процессов образуются кратковременные всплески волн с плотностью энергии гравитационного излучения до десятков тысяч эрг на квадратный сантиметр поверхности Земли.

Источниками непрерывного излучения должны быть двойные звезды, вращающиеся вокруг общего центра тяжести и посылающие периодические волны тяготения. Большая часть потока мощности излучения таких звезд направлена вдоль их оси вращения.

Любопытно сопоставить вот что. Со времени предсказания Максвеллом существования электромагнитных волн до их экспериментального обнаружения немецким физиком Г. Герцем прошло около 10 лет. А после опу-

блечения Эйнштейном утверждения о необходимости существования гравитационных волн прошло около 70 лет, но гравитоны все еще не найдены. Причина этого в том, что силы гравитации в 10^{40} раз слабее электромагнитных. Отсюда следует, что если и удастся «поймать» гравитационное излучение, то только то, источником которого являются самые массивные тела в природе — звезды.

Та же причина, которая обуславливает слабую интенсивность дошедшего до Земли гравитационного излучения, влияет и на его детектирование. Взаимодействие гравитонов с веществом должно быть настолько слабым, что физики рассчитывают зарегистрировать только один гравитон из 10^{23} гравитонов, прошедших через детектор.

Мощность излучения гравитирующих тел (масс) квадратично зависит от величины их деформации, а также от их размеров. От частоты вибрации эта зависимость выражается уже 6-й степенью.

Единицей измерения гравитационного излучения оказывается отношение 5-й степени скорости света к гравитационной постоянной; это отношение имеет размерность мощности и составляет $3,6 \cdot 10^{52}$ ватт, что больше выделяемого в секунду тепла и света во всей нашей Вселенной и соответствует превращению в энергию ежесекундно 200 тысяч масс, каждая из которых равна массе нашего дневного светила. Чтобы наглядно представить себе масштабность этой величины, сравним ее с мощностью теплового излучения Солнца: она составляет всего 10^{26} ватт.

Ясно, что измерять с помощью такой величины мощность гравитационного излучения космических тел, если их масса значительно меньше массы Солнца, — это все равно что определять километровой линейкой размеры элементарной частицы. Даже излучение системы бинарных (двойных) звезд вряд ли возможно зарегистрировать прежде всего из-за того, что они находятся невероятно далеко от Земли. Надежда лишь на то, что таких систем во Вселенной миллиарды, и они в сумме создают такой фон гравитационного излучения, на который, может быть, и отреагируют приборы на Земле.

Другой источник гравитационных волн — коллапс звезд, завершающийся взрывом Сверхновой. Такое событие, как мы уже говорили, происходит в каждой галактике несколько раз в столетие. Причина взрыва в том,

что в результате выгорания ядерного топлива в звезде нарушается равновесие между сжимающими звезды силами тяготения самой массы и уравнивающими их изнутри расталкивающими силами теплового давления. Интенсивность термоядерного синтеза в звезде со временем уменьшается, тепловое давление изнутри уже не уравнивает силы тяготения, и они сжимают звезду до момента, когда она взрывается. Так образуется Сверхновая.

В результате взрыва возникает либо нейтронная звезда, состоящая целиком из нейтронов, которые не расталкиваются, а плотно сжаты ее массой, либо «черная дыра», которая уже не излучает. Какой из этих процессов произойдет при взрыве Сверхновой, зависит от первоначальной массы сколлапсировавшей звезды. Превращение в «черную дыру» происходит, если масса звезды в момент коллапса превышает массу Солнца более чем в три раза. Для «черной дыры» характерно, что ее размер меньше гравитационного радиуса — максимального радиуса тела, из поля тяготения которого не может вырваться даже квант света. Величина этого радиуса определяется из равенства центробежной силы и силы тяготения для кванта. Именно так рассчитывается и величина первой космической скорости тел, необходимой для того, чтобы вывести их на околоземную орбиту, то есть находится из равенства для этих тел центробежной и гравитационной сил Земли.

Во время коллапса звезды происходит сильное искажение пространства-времени и образуется мощное гравитационное излучение. Если бы коллапс осуществлялся строго симметричным образом, то гравитационные волны не рождались бы. Однако вращение звезды и турбулентность ее вещества приводят к несимметричному движению материи во время коллапса и образованию волн тяготения. Во время коллапса значительная часть массы звезды переходит в гравитационное излучение.

Известны большие скопления звезд в галактиках, которые образуют такие тесные системы, что способны сколлапсировать в одну «сверхдыру». Галактики содержат по несколько сотен тысяч групп звезд, каждая из которых состоит из сотен тысяч отдельных звезд, падающих на их общий центр тяжести. Часть звезд достигает общего гравитационного радиуса группы, и вмес-

те они образуют «черную дыру». При падении звезд на их общий центр тяготения должно излучаться в тысячи раз больше гравитационной энергии, чем при взрыве Сверхновой.

Предсказание Эйнштейна 1915 года о том, что ускользящая масса должна терять энергию в форме гравитационных волн, подтвердилось в 1981 году. Астрономы обнаружили медленное уменьшение размеров орбиты пульсара, входящего в двойную звезду.

Как мы уже знаем, для пульсара характерно строго периодическое импульсное электромагнитное излучение. Радиопульсары отождествляются с быстро вращающимися нейтронными звездами, у которых есть активная область, генерирующая излучение в узком конусе. Пульсация излучения связывается с вращением звезды вокруг оси, при котором «радиозайчик» ее излучения пробегает по небесной сфере один оборот за период вращения звезды, проходя и через Землю. Пульсары впервые открыли в 1967 году. Стабильность периода излучения пульсаров связана с их огромной массой. Так, очень трудно ускорить или замедлить вращение огромного сверхтяжелого маховика из-за большой его инерции.

В 1974 году с помощью 300-метрового радиотелескопа в Аресибо (Пуэрто-Рико) Р. Халсом и Д. Тейлором (США) был обнаружен пульсар в составе двойной звезды, подходящий для проверки гипотезы излучения вращающимися двойными звездами гравитационных волн. Этот пульсар находится от Земли на расстоянии 15 тысяч световых лет. Импульсное радиоизлучение пульсара повторяется с частотой 19 герц. Точно измеряя время прихода радиопульсов на Землю, можно определить параметры орбиты пульсара в двойной системе звезд.

Необычно в этом пульсаре то, что его частота периодически меняется. Это объясняется вращением пульсара вокруг другой, невидимой в оптическом и радиодиапазоне звезды, с которой пульсар образовал систему. При орбитальном движении пульсара, когда он приближается к Земле, из-за доплеровского смещения частота его излучения увеличивается, а при удалении — уменьшается. Смещение частоты соответствует скорости движения пульсара в направлении Земли 300 километров в секунду, а от Земли — 75 километров в секунду. Период изменения частоты пульсара составляет 7

часов. Эти данные позволили определить форму орбиты пульсара, которая представляет собой сильно вытянутый эллипс.

Если гравитационные волны существуют и уносят энергию от этой звездной системы, то ее орбитальная энергия должна постепенно уменьшаться, что и приведет к уменьшению размеров орбиты и периода орбитального движения пульсара. По расчетам период орбитального движения пульсара, определяемый по доплеровскому смещению частоты радионизлучения, должен уменьшаться на одну десятимиллионную секунды при каждом обороте. Такую малую величину обнаружить не удастся. Однако это изменение приведет к тому, что пульсар пройдет каждый раз ближайшую ко второй звезде точку эллипса (периастр) с некоторым опережением по сравнению с воображаемой системой с постоянным орбитальным моментом. Расчеты показывают, что через год такое опережение должно составлять уже 4 тысячные секунды, а через 6 лет — около одной секунды. И действительно, 6-летние наблюдения подтвердили наличие такой величины опережения и соответствующего изменения периода смещения частоты пульсара, что прекрасно согласуется с общей теорией относительности. Так косвенно удалось открыть гравитационное излучение у двойной звездной системы.

Поиски свидетелей космических катастроф

Первый опыт по детектированию гравитонов осуществлен Д. Вебером в Мэрилендском университете, США. После 9 лет трудной и квалифицированной работы в июне 1969 года Вебер сообщил о наблюдении совпадений между показаниями двух детекторов, один из которых находился в Мэрилендском университете, а другой — в Аргонской национальной лаборатории вблизи Чикаго, на расстоянии 1000 километров от первого.

Сообщение об этом результате, полученном через 53 года после первой работы Эйнштейна по тяготению, произвело большое впечатление на научную общественность. Похожие по постановке на веберовские новые опыты проводятся с тех пор в СССР, Японии, США, ряде европейских стран.

Детектор Вебера — это сплошной массивный цилиндр весом в 1,5 тонны, длиной 1,5 и шириной 0,66 метра. В обоих таких детекторах сигналы совпадали в пределах

временного разрешения 0,1 секунды. Сигналы регистрировались по колебаниям торцов цилиндра, к которым были приклеены пьезодатчики. Механические колебания датчиков вызывали слабый ток, усиливаемый чувствительной аппаратурой. Антенны-цилиндры подвешивались горизонтально на прочнейших нитях к специальной подставке, размещенной в вакуумной камере. Вся аппаратура имела надежную сейсмическую изоляцию. Такая антенна способна обнаружить гравитационные волны, вызывающие смещение поверхности цилиндра на расстояние, меньшее размеров ядер — всего на 100 триллионную долю сантиметра!

Но и этого недостаточно для надежной регистрации гравитационного излучения.

Основная помеха при поиске ничтожно слабых колебаний — это тепловые колебания атомов самой антенны. С понижением температуры тепловое движение их затухает. Вышнего предела чувствительности можно было бы достигнуть при полном отсутствии колебаний атомов. В квантовой механике, как известно, принцип, названный соотношением неопределенностей (принцип неопределенности), запрещает микрочастицам иметь одновременно точное значение координаты и скорости. Этому соотношению не удовлетворяет состояние покоя частицы. Поэтому и при самой низкой температуре вещества — при абсолютном нуле — атомы все равно колеблются. Однако тогда они имеют минимально возможную кинетическую энергию теплового движения. Именно в таком состоянии вещество антенны обладает наибольшей чувствительностью. К ней удастся приблизиться, поместив антенну в жидкий гелий при температуре ниже 4 градусов Кельвина. В этом случае металл антенны оказывается в сверхпроводящем состоянии.

Другая возможность увеличения деформации антенны и облегчения регистрации колебаний, вызванных гравитационным излучением, — это увеличение массы и размеров антенны.

Еще одна возможность повышения чувствительности — увеличение добротности антенны. Понятием добротности характеризуется любая колебательная система. Чем выше добротность, тем дольше энергия колебания сохраняется в антенне и тем легче эту энергию измерить. Добротность существенно зависит от выбранного материала антенны.

Какие же результаты получил Вебер?

Примерно одно событие в день происходило одновременно в обоих цилиндрах. Совпадение сигналов в двух антеннах было необходимо для уверенности в том, что сигналы вызваны не случайными колебаниями почвы или другими причинами местного характера. Длина же гравитационной волны так велика, что она вызывает колебания в разнесенных на тысячи километров антеннах одновременно. Хотя случайные совпадения колебаний в обоих цилиндрах также были возможны, рассчитанная их частота должна была быть в 10 раз меньше обнаруженной Вебером.

Несмотря на всю серьезность опытов Вебера, имеются сомнения в истолковании их результатов. По астрономическим многовековым данным, коллапс звезды — вспышка Сверхновой, могущая быть источником гравитонов, — наблюдается в Галактике лишь несколько раз в столетие. Между тем частота совпадений в опыте Вебера превысила ожидаемую в 10 тысяч раз и поэтому выглядит сомнительной. Не исключена какая-то методическая ошибка в опыте.

После Вебера в течение десятилетия его опыты повторялись (в том числе и в СССР) с еще более высокой чувствительностью, но не дали ни одного случая совпадения сигналов в разнесенных антеннах. Большинство исследователей считают результаты Вебера ошибочными. Однако не следует исключать возможность, что ему «повезло» и он сделал измерения в момент необычайно высокой интенсивности излучения. В это время в центре Галактики могла образоваться «черная супердыра», в которую втягивались звезды, издавая при гибели последний «крик» — всплеск гравитационного излучения. Может, его и зарегистрировал Вебер?!

Поиск свидетелей космических катастроф продолжается в 18 лабораториях разных стран. Эксперименты с цилиндрами веберовского типа готовятся и проводятся в университетах СССР (МГУ), США — в Мериленде, Луизиане, Рочестере, Стэнфорде, Италии — в Риме.

В Стэнфорде пошли по пути увеличения массы антенны — здесь используется 5-тонный металлический цилиндр, охлажденный почти до абсолютного нуля.

В лабораториях МГУ опыты проводятся под руководством В. Б. Брагинского. Здесь пошли по пути увеличения добротности. Вместо алюминиевого материала

взяли монокристаллический сапфир, имеющий по сравнению с алюминием в десятки тысяч раз большую добротность. Это позволило уменьшить в сотни раз размер антенны, а потому стало легче с ней обращаться, охлаждать ее. Кристалла такого размера и чистоты в природе не существует. Монокристалл сапфира весом 6 килограммов (!) сумели вырастить в Институте кристаллографии АН СССР.

Как будут регистрироваться в опыте МГУ колебания поверхности антенны, меньшие размеров ядер?

Торец кристалла станет одной из пластин конденсатора. При изменении зазора между пластинами на торцах емкость конденсатора изменится, что и будет измерено. Емкость соединяется с индуктивностью и получается колебательный контур. Он является первой ступенью усиления антенны. Дальнейшее усиление сигнала осуществляется электроникой.

Для надежной регистрации гравитационной волны совпадение сигналов должно быть зарегистрировано в нескольких лабораториях мира одновременно. Между МГУ и Калифорнийским технологическим институтом заключен договор, по которому измерения будут одновременно вестись антеннами в этих учреждениях, отстоящих одно от другого на 10 тысяч километров. Совпадение сигналов будет регистрироваться с точностью не десятой доли секунды, как в опыте Вебера, а тысячной доли секунды, что позволит в 100 раз уменьшить вероятность случайного совпадения сигналов в обеих антеннах.

Таким образом, новые подготавливаемые эксперименты по поиску всплесков гравитационного излучения будут иметь чувствительность в 1000 раз большую, чем в опытах Вебера, и смогут, вероятно, зарегистрировать слабые сигналы более удаленных от Земли космических катаклизмов. Возможно, что ближайшее десятилетие принесет открытия и в этой, пожалуй, самой интригующей сфере физических поисков!

Человек создает гравитоны в лаборатории

В Объединенном институте ядерных исследований в Дубне П. Н. Боголюбовым, А. Ф. Пискаревым и Н. С. Шавохиной предложена принципиально новая идея открытия гравитонов — создание их в лаборатории*.

* См.: Излучение и детектирование гравитационных волн в лабораторных условиях. Препринт ОИЯИ Р13-81-95, 1981.

Предлагаемая физическая установка для возбуждения гравитационных волн, хотя и не имеет космических масштабов, но будет достаточно внушительной как по размерам, так и по сложности. Цилиндр длиной 10 метров и сечением несколько квадратных сантиметров наполняется замороженным водородом или азотом. Через эту оптически прозрачную среду пропускаются лучи лазера двух частот мощностью в тысячи мегаватт. Разность между частотами делается равной частоте молекулярных колебаний водорода. Мощное электромагнитное поле лазерного излучения вызовет колебания молекул водорода. Эта колеблющаяся масса, состоящая из крохотных молекул водорода, испускает гравитационное излучение. Свет сформирует колебание триллиона триллионов молекул рабочего вещества в одной фазе, а такие колебания, как известно, называются когерентными. Поэтому гравитационное излучение также будет когерентным.

Расчеты авторов этого оригинального эксперимента показывают, что в лаборатории можно получить когерентное гравитационное излучение большой мощности — до нескольких эрг в секунду. Эффективную регистрацию гравитонов можно осуществить, определяя обратное воздействие их на среду, предварительно возбужденную волной лазера в прозрачном диэлектрике. Электроны в диэлектрике возбуждаются излучением лазера и переходят на более высокие энергетические уровни. Прохождение слабой гравитационной волны через «накачанное» вещество вызовет одновременный переход электронов обратно на низшее состояние. При этом будет излучено когерентное световое излучение с частотой, равной разности частоты накачивающего лазера и гравитационной волны.

Если в качестве рабочего вещества такого лазера использовать замороженный до температуры жидкого гелия кристалл и сделать мощность накачки лазера около 1000 мегаватт, то интенсивность световой волны будет достаточной для ее регистрации. Так в лабораторных условиях можно будет убедиться в справедливости фундаментальнейшего предсказания теории о существовании гравитационных волн.

Однако следует отметить, что лабораторный опыт не заменит эксперименты веберовского типа, необходимые для проверки наших представлений об астрофизических

процессах во Вселенной. Разные по постановке опыты дополняют один другой в нашем понимании всеохватывающего явления гравитации.

Перспективы

...Есть ли в науках и искусствах предел лучшего, через который наш рассудок не может переступить? Возможно, что эта точка бесконечно удалена, но тем не менее при каждом приближении к ней путь перед нами становится короче.

Г. Лихтенберг

Пределы наук походят на горизонт: чем ближе подходят к ним, тем более он отодвигается.

П. Буаст

Новые проекты ускорителей

Итак, закончен рассказ о прошлом и настоящем физики элементарных частиц. Заглянем в ближайшее будущее. «Лучший пророк для будущего — прошлое» (Байрон).

История физики за последние 40 лет показала, что мощные ускорители позволяют получать принципиально новые сведения о микромире, неожиданные даже для не страдающих отсутствием воображения теоретиков. Будущее физики частиц связано с созданием еще более мощных ускорителей и накопительных колец для формирования встречных пучков. Решающее значение приобретает внедрение в ускорительную технику сверхпроводящих магнитов, с помощью которых можно получать в несколько раз большие поля, чем это дают обычные электромагниты, а также использование встречных пучков с энергиями в сотни и тысячи гигаэлектронвольт.

Какие же новые ускорители будут во второй половине 80-х годов и в 90-х годах?

Уже строятся две и запланировано строительство еще трех установок, рассчитанных на ускорение заряженных частиц до 1000 гигаэлектронвольт для протонов и до 100 гигаэлектронвольт для электронов и позитронов. Одновременно предполагается использовать эти ускорители для создания встречных пучков.

В Национальной ускорительной лаборатории им.

Ферми в США в одном туннеле над главным кольцом протонов с энергией ускорения до 400 гигаэлектронвольт смонтировано другое кольцо со сверхпроводящими магнитами. В этом суперкольце протоны ускоряются до 1000 гигаэлектронвольт. Суперкольцо — это первое ускорительное кольцо, состоящее целиком из сверхпроводящих магнитов с полем в несколько тесла — десятки килогаусс. Таких магнитов здесь 1000, размером несколько метров каждый. Диаметр кольца — 2 километра. Расположено оно на глубине 6 метров под землей. В суперкольце протоны вводятся после предварительного ускорения в главном кольце.

Главное кольцо предназначается также для предварительного ускорения антипротонов. Пучки протонов и антипротонов могут вводиться в суперкольцо одновременно — так, чтобы, ускоряясь, они вращались в противоположные стороны. Орбиты пучков пересекаются в двух точках, находящихся в экспериментальных залах.

На этой установке будут изучать соударения протонов и антипротонов. Энергия столкновения составит 2 тысячи гигаэлектронвольт.

Предполагается, что эта установка сможет работать не только с протонными или протон-антипротонными пучками, но и со встречными пучками электронов и протонов. Схема такова: пучок электронов ускоряется в главном кольце сначала до 12, а затем до 50 гигаэлектронвольт и вводится в суперкольцо, где он сталкивается с пучком протонов, ускоренных до 1000 гигаэлектронвольт.

В США разрабатывается проект протонного ускорителя на энергию 20 тысяч гигаэлектронвольт, который даст возможность экспериментировать со встречными протон-протонными и протон-антипротонными пучками. Сокращенное наименование проекта SSC (от Superconducting Super Collider — «Сверхпроводящий сверхстолкновитель»).

Хотя до больших энергий протоны легче ускорять, чем электроны (из-за меньшей потери протонами энергии на излучение при круговом движении по орбите), но зато приходится иметь дело с большей величиной фона мешающих событий и несколько иной физикой взаимодействий, нежели в электрон-позитронных соударениях. С этим связан большой интерес к строительству второй крупнейшей зарубежной ускорительной установки —

ЛЕП. Это сокращение образовано от первых букв английского названия Large Electron — Positron. ЛЕП строится в ЦЕРНе. Официальная церемония заложения фундамента кольца состоялась 13 сентября 1983 года. Ее открыли президенты Франции и Швейцарии — Ф. Миттеран и П. Эберт.

Длина окружности кольца будет 27 километров, а энергия частиц сперва 2×50 гигаэлектронвольт, а затем 2×100 гигаэлектронвольт. В кольце ЛЕП в одной вакуумной трубе электроны и позитроны будут циркулировать в противоположных направлениях и сталкиваться в 8 местах; 4 тысячи электромагнитов, создающих поле до 100 килогаусс, расположатся вдоль кольца и удержат частицы на орбите.

Совершенствование технологии создания ускорительной техники в последнее десятилетие дало возможность использовать старые ускорительные установки как составные части новых и снизить стоимость их строительства. Такая практика уже широко реализована в ЦЕРНе. То же предусмотрено и для ЛЕП. Электроны и позитроны сперва будут ускоряться до энергии 3,5 гигаэлектронвольта на малом синхротроне, затем вводиться в суперсинхротрон. Приобретая здесь энергию в 22 гигаэлектронвольта, для окончательного ускорения они попадут в кольцо ЛЕП.

ЛЕП будет настоящей фабрикой Z-бозонов, благодаря которой перед физиками откроются благоприятные возможности для более глубокого изучения электрослабого взаимодействия.

В подготовке экспериментов ЛЕП участвуют и советские физики, например в опыте, который будет поставлен под руководством лауреата Нобелевской премии С. Тинга. В единый по интересам научный коллектив входят 23 группы физиков из 10 стран мира. Экспериментальная установка, на которой этот международный коллектив будет работать, очень необычна. От известных она отличается тем, что находится внутри магнита — «магнитной пещеры». Ее размер будет 12 метров в длину и столько же в диаметре. Магнитное поле в сотни гаусс создается железным магнитом весом 8 тысяч тонн. У экспериментальной установки, предназначенной для поиска новых частиц, ожидается ювелирная точность в измерениях потоков адронов входящим в его состав калориметром (его делают советские физики). Очень точ-

но будут измеряться потоки электронов, мюонов и гамма-квантов.

В СССР завершен проект ускорителя в Серпухове со сверхпроводящими магнитами на энергию 3 тысячи гигаэлектронвольт. Длина окружности составит 20 километров!

Существует проект создания в Стэнфорде комплекса с двумя встречными линейными электронным и позитронным ускорителями с энергией по 100 гигаэлектронвольт каждый. Оригинальность проекта в том, что здесь частицы будут разгоняться не в кольцевых, а в двух длинных (по несколько километров каждый) линейных ускорителях. При таком движении электроны даже очень высокой энергии практически не излучают. В кольцевых же ускорителях электроны излучают, что является помехой на пути повышения их энергии и причиной повышенного потребления мощности самими ускорителями.

Что же будут искать на этих ускорителях?

Первоначально планировалось открыть теоретически предсказанные W- и Z-бозоны. Но поскольку они уже открыты, то теперь ставится иная задача — изучить типы распада этих частиц, определить время их жизни, а также попытаться обнаружить хиггсовы бозоны, существование которых является необходимым элементом единой теории электрослабых сил.

Другое важное направление — изучение природы адронных струй. Существование их говорит о рождении двух или большего числа подструктур, но обязательно ли это кварки с типичным только для них дробным зарядом?

В теории кварков предсказывается существование парного *b*-кварку тяжелого *t*-кварка и многих комбинаций этих кварков с другими. Проверка этих предсказаний имеет решающее значение для понимания структуры частиц.

Все эти вопросы и предстоит решать на новых ускорителях.

Физический эксперимент и электроника

В современных ускорителях при соударении частицы, ускоренной до сотен гигаэлектронвольт, с нуклоном мишени рождаются десятки адронов, энергия которых достигает нескольких гигаэлектронвольт. Во всем объеме

мишени и детектора каждая из этих частиц в свою очередь может вызвать реакцию с рождением новых частиц. Какая-то часть этих новых частиц распадается в детекторе, и этот распад тоже сопровождается «звездами». Сложнейшая цепочка реакций! По информации о прохождении частиц в веществе мишени и детектора необходимо определить заряд, массу, импульс, энергию всех «действующих лиц».

Задача не из простых, решить ее методами, которыми пользовались еще не так давно, невозможно. На самом деле, как было раньше? Частицы оставляли свои следы на фотографиях, а потом десятки физиков годами расшифровывали эти снимки (а ведь их — тысячи!), чтобы добыть интересующую экспериментаторов информацию о произошедших в микромире событиях.

С середины 70-х годов в физике адронов основными стали опыты с использованием специальных счетчиков и проволочных камер, в которых пролетающие частицы вызывают электрические импульсы, мгновенно поступающие в обрабатывающую электронику.

Электроника, которая особенно интенсивно развивается в последние годы, оказывает теперь физике неоценимую услугу. Неизмеримо выросло быстродействие ЭВМ, уменьшились их габариты, увеличилась их надежность, в то же время снизилась стоимость в расчете на условную единицу обрабатываемой информации. Это позволяет обрабатывать информацию непосредственно в ходе самого опыта, в интервалах между импульсами ускорителя, то есть всего за несколько секунд.

Какие требования предъявляет к электронике и вычислительной технике современный эксперимент в физике высоких энергий? Какие объемы информации поступают в электронику во время опытов и с какой скоростью должна производиться ее обработка?

В проволочных камерах длиной в несколько метров проволочки заполняют весь объем и расположены в плоскостях с интервалом в несколько миллиметров. Сами плоскости отстоят одна от другой на расстоянии в несколько сантиметров. В камере — до 100 тысяч проволочек! И все они соединены с контактами обрабатывающей электроники. Каждый элемент электроники срабатывает лишь под воздействием «своего» сигнала, «своего» импульса.

Чтобы геометрически реконструировать путь проле-

тевшей мимо проволочки частицы, надо различать время поступления импульсов с точностью до десятых долей наносекунды. Кроме того, эти сигналы надо «рассортировать» еще по уровням их амплитуд. За несколько наносекунд — время пролета частиц через детектор — в электронике поступают тысячи сигналов. За короткое время обрабатываемая и измерительная электроника должна принять, запомнить и затем проанализировать миллионы элементарных единиц информации, так называемых бит. Иначе говоря, завершить все этапы (а их три: геометрическая реконструкция следов частиц в пространстве, кинематическая обработка, анализ результатов измерений) обработки информации за один цикл работы ускорителя, который длится несколько секунд. Напомним для сравнения, что оперативная память крупной советской ЭВМ БЭСМ-6 составляет всего несколько миллионов бит.

Математическое обеспечение эксперимента в современной физике высоких энергий стало возможным, когда появилась электроника, имеющая большое число — сотни тысяч — вводных контактов, сверхбыстродействие, совершенную логику — такую, которая позволяет вести параллельную обработку сигналов, поступающих асинхронно от функционально независимых элементов.

Такая электроника появилась сравнительно недавно. Как известно, первое поколение ЭВМ (50-е годы) было на радиолампах. В этих ЭВМ передача электрических сигналов осуществлялась движением электронов. Если напряжение между электродами составляет несколько десятков вольт, то электроны движутся со скоростью, равной сотым долям скорости света в вакууме. При такой скорости они проходили через лампы, размер которых к тому времени хотя и не превышал нескольких сантиметров, за десятки наносекунд. Естественно, что быстродействие ЭВМ первого поколения было невелико, на решение даже простейших логических задач они затрачивали много времени. (Конечно, «много», если подходить к оценке их возможностей с современными мерками, а тогда и десятки тысяч арифметических операций в секунду было большим достижением, настоящей революцией.)

В 60-х годах благодаря полупроводникам появилась возможность создания ЭВМ, которые могли уже производить миллионы операций в секунду. В 70-х годах была

разработана технология изготовления интегральных схем, а затем и больших интегральных схем. Созданные на их основе ЭВМ могли заниматься не только вычислениями, сбором информации с последующей ее обработкой, но и брать на себя управление экспериментом.

Интегральная схема — это микроминиатюрное электронное устройство, элементы которого нераздельно связаны конструктивно, технологически и электрически. В интегральных схемах на кристалле кремния размерами в несколько миллиметров размещается до ста тысяч транзисторов и несколько десятков внешних выводов. Время прохождения сигналов и работы схемы определяется, по сути дела, только временем прохождения электромагнитной волны в цепях длиной в несколько сантиметров, то есть десятими долями наносекунды. Этого уже, оказывается, достаточно для получения быстродействия, требуемого для современного физического эксперимента. Так изменение количества — уменьшение размеров элементов электроники — привело к новому качеству — феноменальному увеличению ее быстродействия.

Однако требовалось увеличить не только быстродействие, но и память, а также число вводных контактов. Этого достигли путем использования большого количества электроники при одновременном повышении ее плотности в единице объема (многих тысяч интегральных схем), применения микропроцессоров — устройств, выполняющих арифметические действия и логические операции, заданные программой, и управляющих вычислительным процессом.

Во всех крупных исследовательских центрах мира ведется разработка опытов на ускорителях элементарных частиц с применением наисовременнейших электронных управляющих систем.

Одна из таких систем, названная стандартизированной системой сбора, обработки данных и управления, создана в 1977—1982 годах группой зарубежных физиков и инженеров. При помощи этого стандарта (у него есть имя — Фастбас) уже проведен ряд успешных экспериментов в Стэнфорде и ЦЕРНе. Он, по всей видимости, будет служить физикам до тех пор, пока в самой электронике не произойдет новый технологический рывок.

Стандарт создан по модульному принципу, а сами модули различаются логикой работы входящих в них

процессоров, а также характером аналоговых операций (действий с непрерывно поступающими сигналами).

Есть в Фастбасе функциональный узел, который приводит в готовность весь стандарт. Он в своей памяти держит все механические, электрические и логические схемы электронной обрабатывающей системы, а также программу ее работы. Этот узел физики называют хозяином. И он действительно ведет себя как хозяин — он, к примеру, в случае каких-либо нарушений в системе может переадресовать часть программы другому — резервному — модулю. Информацию о работе модулей хозяину выдает специально предназначенный для этой цели модуль в так называемом крейте — каркасе, содержащем 26 верхних и столько же нижних разъемов. Каждый разъем имеет 130 штырьков — электрических контактов — и печатные платы модулей.

Стандарт Фастбас осуществляет все три операции при проведении физического эксперимента: производит геометрическую реконструкцию микрособытий, кинематическую и физическую обработку данных, поступающих с измерительной аппаратуры.

Объединение всех сил природы

Магистральной задачей теории остается создание единой картины сил природы, включая гравитационные, то есть единой теории поля.

И тут нам придется повторить кое-что из того, о чем уже рассказывалось в предыдущих главах.

Различия между взаимодействиями появились, по-видимому, на ранней стадии образования Вселенной в процессе ее остывания и уменьшения средней энергии частиц. Свидетельством в пользу единства сил на той стадии развития может стать распад протона, если он будет обнаружен. По принятым ныне моделям время жизни протона не должно превышать 10^{34} лет. Сейчас опыты уже показали, что протон живет по крайней мере дольше, чем 10^{31} лет.

Время жизни протона — величина статистическая. Среди бесчисленного множества протонов Вселенной какой-то из них может завершить свой жизненный цикл, то есть распасться в данный момент, через секунду, час, годы и т. д. Стало быть, чем больше мы возьмем вещества для изучения, тем вероятнее «поймать» распад про-

тона. Каждый случай протонного распада послужит экспериментальным доказательством справедливости нынешних теоретических моделей. Но может случиться и другое: не справедливость их будет доказана, а бесперспективность. Это произойдет тогда, когда поиски протонных распадов завершатся выводом, что время жизни протона превышает 10^{33} лет. При таком условии экспериментальная проверка теоретических построений станет слишком сложной и недоступной в обозримом будущем.

Теории «великого объединения» предсказывают существование частиц с массой 10^{14} гигаэлектронвольт, которой соответствует длина волны 10^{-29} сантиметра. Этот масштаб расстояний уже соизмерим с тем предельно малым размером, который принят в теории гравитации, — с так называемой планковской длиной l (10^{-33} сантиметра). На таком расстоянии между частицами силы гравитации превосходят все прочие, и теория элементарных частиц должна их учитывать. Расстояние 10^{-33} сантиметра названо планковской длиной потому, что на возможность ее существования указал Макс Планк.

Фундаментальная длина l требует дискретности пространства и образуется из комбинации квантовомеханической постоянной Планка h , скорости света c и гравитационной постоянной G .

Обратная величина длине l имеет размерность массы (в естественных единицах) и равна массе в стотысячную долю грамма. Такой массой не обладает ни одна из известных ныне элементарных частиц — ведь это масса пылинки! Но теоретически столь тяжелая частица возможна, у нее есть даже название — планкион или максимон. Предполагается, что максимоны могли существовать в первые 10^{-43} секунды с момента рождения Вселенной (по теории Большого взрыва).

Согласно развиваемой советским теоретиком М. А. Марковым теории максимоны могут под действием сил гравитации бесконечно сжиматься, коллапсировать и превращаться в элементарные частицы.

Если считать за основу мироздания гравитацию, дискретность пространства с минимальной «ячейкой» в планковский размер l и теорию относительности с ограниченной скоростью распространения — скоростью света, то из трех констант G , l и c получаем квантовую посто-

янную Планка h . По такой логике свойство материи — квантовость, оказывается, обусловлено геометрией пространства.

Обсуждение возможностей существования максимумов и их роли в иерархии частиц — это попытка предугадать качественные черты нелинейной физики, которая возникает в сильных гравитационных полях при сверхплотном состоянии вещества. Теория здесь еще не создана.

Физики Дж. Уилер и Г. Тредер показали, что планковская длина управляет флуктуациями вакуума гравитационного поля. Эти флуктуации ничтожны по сравнению с плотностью энергии вакуума при расстояниях порядка размеров нуклона, но сравнимы с энергией вакуума на размерах планковской длины. Эту плотность Уилер оценивает как комбинацию тех же трех фундаментальных постоянных, о которых говорилось выше, и получает величину в 10^{94} граммов в кубическом сантиметре. По Уилеру, гигантские квантовые флуктуации гравитационного поля на планковских размерах, разрешенные соотношением неопределенностей (флуктуации означают возможность несохранения энергии при виртуальных процессах, вот почему нужно соотношение неопределенностей), приводят к искривлению пространства-времени и пенообразной структуре физического вакуума, состоящего из множества связанных один с другим пузырьков. Пространство оказывается состоящим из ячеек, квантовано.

Для наглядного представления такого вакуума Уилер использует образ океана, если рассматривать его с разной высоты. С большой высоты океан кажется гладким, если спуститься ниже, станет виден некий узор, а с более близкого расстояния — мелкомасштабная рябь.

В модели, предложенной физиком К. Вохлером из ГДР, флуктуации вакуума гравитационного поля на планковских размерах могут приводить к среднему полю тяготения, подчиняющемуся уравнению Эйнштейна для свободного пространства.

Возможно, что на пути теоретического объединения всех сил природы и лежит разгадка главной тайны микромира: почему все электроны или протоны тождественны?

Физика элементарных частиц и общество

Ныне затраты на науку увеличились до колоссальных размеров, составляющих заметную долю бюджета любой экономически развитой страны.

Естественно, возникает вопрос: а что дает это обществу? Для чего нужно строить, к примеру, все более мощные ускорители? До каких пор увеличение расходов на развитие физики элементарных частиц будет содействовать общим интересам человечества, развитию всего общества?

Вопросы эти непростые. Чтобы ответить на них, нужно углубиться в целый ряд общих проблем социального и экономического прогресса, проблем, порожденных научно-технической революцией, сложных взаимоотношений науки как социального института с обществом. Но у нас такой возможности нет, поэтому мы ограничимся кратким обзором развития физики микромира и основных ее «выходов» в практику — они буквально у всех на виду.

Первые полвека, начиная с открытия электрона, завершились созданием радио и телевидения, электроники, атомной энергии. Этот прогресс связан с достижениями микрофизики. Ее представления стали основой естественных и технических наук XX века, в частности физики твердого тела, химии, квантовой оптики и т. д. Огромна мировоззренческая роль знаний о строении материи.

Сейчас широко внедряются в практику достижения ядерной техники и физики частиц. Так, пучки протонов и пи-мезонов используют в онкологии; с помощью пучков нейтронов решена актуальная задача молекулярной биологии — определена геометрическая структура иммуноглобулина; развиваются ядерно-физические методы анализа сред с применением изотопов, ускорителей; размытые пучки электронов низкой энергии при облучении лаковых покрытий вызывают мгновенное их затвердевание — это внедрено в радиопромышленности; в Объединенном институте ядерных исследований разработано программное обеспечение советской ЭВМ БЭСМ-6; физика элементарных частиц предложила стандарты для электронной аппаратуры; весом ее вклад в ядерную энергетику.

Пучки частиц широко применяют в радиационном материаловедении. Так, на нейтронном пучке импуль-

сного реактора Объединенного института изучают структуру кристаллов — расположение атомов в кристаллической решетке и изменение их положений под влиянием внешних источников воздействия, например магнитных полей, когда происходит перестройка магнитных доменов в ферромагнетиках. Эта задача решается методом нейтронной дифракции. Нейтроны проходят через упорядоченную структуру в кристалле по тем же законам, что и свет через дифракционную решетку. Параметры решетки определяют по изменению угла рассеяния нейтронов, их скорости и интенсивности отклонения под разными углами. Импульсный реактор выступает в роли нейтронного микроскопа.

Для имитации радиационных условий на внутренней стенке термоядерных реакторов, облучаемых во время протекания термоядерного синтеза продуктами реакции — нейтронами с энергией 14 мегаэлектронвольт, — в Институте теоретической и экспериментальной физики разрабатывается генератор нейтронов на основе сильно-точного линейного ускорителя дейтронов с энергией 35 мегаэлектронвольт*. Нейтроны рождаются при бомбардировке мишени из жидкого лития ускоренными дейтронами. Основная часть первичных дейтронов и вторичных протонов (продуктов реакции) тормозится в мишени и остается в ней. Нейтроны же вылетают в узком угле в несколько десятков градусов с максимумом в энергетическом распределении около 14 мегаэлектронвольт. Ток дейтронов в 100 микроампер позволит получить высокую плотность потока нейтронов — до 10^{15} за секунду на квадратный сантиметр и эффективно использовать этот источник для радиационного материаловедения.

Ускорители сыграют важную роль в гарантированном обеспечении народного хозяйства энергией. Природные энергетические ресурсы и запасы топлива истощаются, а потребность в энергии растет высокими темпами. Практически все современные прогнозы исходят из того, что уже в самом начале XXI века основой Большой энергетики станет ядерная с использованием реакторов на быстрых нейтронах, обладающих неоценимым свойством, — они в процессе работы воспроизводят новый вид горючего: плутоний-239 и уран-233. Образование этих эле-

* См.: Труды 6-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1979.

ментов происходит при захвате нейтронов ядрами имеющегося на Земле в достатке тория-232 и урана-238, многотонные отвалы которых накопились за время получения урана-235 как ядерного топлива. Запасы природного урана и тория в мире велики и позволяют полностью удовлетворить запросы энергетики на столетия.

Но физики идут дальше: их уже не удовлетворяют реакторы на быстрых нейтронах и они приступили к разработке электроядерного способа наработки горючего. В этом способе пучок ускоренных протонов с энергией в сотни мегаэлектронвольт направляется в урановую болванку, используемую как сырье. В мишени рождаются потоки нейтронов с энергией в несколько мегаэлектронвольт. Они захватываются ядрами сырья и образуют ядерное топливо. Базой электроядерного способа будет сверхточный ускоритель, например мезонная фабрика.

В последние годы физика микромира перешла к познанию свойства частиц, которых нет в природе, они рождаются в искусственно вызываемых ядерных процессах. У многих ученых складывается впечатление, что дальнейший путь познания сосредоточился в области искусственно созданного мира. Однако это справедливо лишь отчасти. Ведь каждый нуклон испытывает действие ядерных сил. А может, за эти силы отвечают кварки? Только выяснение полной картины мира позволит понять до конца и те силы, которые связывают нуклоны в ядре. Пока только понять! Эта задача сама по себе имеет огромное значение. Но что она даст для практики, когда будет решена, мы сейчас не можем даже всего и предугадать.

Как видим, рост затрат на одну только физику элементарных частиц, физику микромира, не говоря уже о науке в целом, исторически, экономически и социально оправдан, ибо открытия в фундаментальных науках оказывают решающее влияние на развитие техники и общества в целом.

Как и когда были открыты основные элементарные частицы

Фотон γ . В XVIII веке Ньютон вывел законы преломления и отражения света, исходя из представлений о свете как о потоке материальных частиц.

В 1900 году Планк объяснил спектральное распределение излучения замкнутой раскаленной полости на основе гипотезы о поглощении и испускании света квантами (quantum — «количество»).

В 1905 году Эйнштейн объяснил фотоэффект на основе закона сохранения энергии при взаимодействии кванта света — фотона — с атомными электронами.

В 1923 году Комптон открыл закономерности рассеяния рентгеновского излучения на кристаллах и объяснил их наличием у фотона импульса.

Электрон e . В 1894—1897 годах Томсон пришел к выводу о существовании электрона, исследуя катодные лучи.

Протон p . В 1914 году Резерфорд наблюдал положительно заряженные частицы, возникающие при облучении нейтральных атомов водорода электронами.

В 1919 году Резерфорду удалось зарегистрировать протоны, выбитые из ядер азота высокоэнергетическими альфа-частицами.

Нейтрон n . В 1920 году Резерфорд предположил существование нейтрона.

В 1930 году Боте и Беккер обнаружили излучение, возникающее при бомбардировке ядер бериллия альфа-частицами, но приняли его за гамма-излучение.

В 1932 году Жолио и Кюри наблюдали выбивание

этим излучением протонов из разных веществ, но считали излучение электромагнитным.

В том же 1932 году Чедвик повторил опыты и доказал, что новое излучение — это нейтроны с массой протона.

Позитрон e^+ . В 1928 году Дирак предсказал его существование теоретически (как следствие релятивистской теории движения электрона).

В 1932 году Андерсон наблюдал следы позитронов при улавливании космических частиц камерой Вильсона, помещенной в магнитное поле.

Мю-мезон μ . В 1936 году Андерсон наблюдал следы мюонов космического происхождения в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле.

Пи-мезон π . В 1935 году Юкава на основе изучения ядерных сил взаимодействия между протонами и нейтронами предсказал его существование.

В 1947 году Пауэлл наблюдал следы пионов в фотоэмульсии, «улавливающей» космические лучи.

Ка-мезон K . В 1947 году Батлер и Рочестер наблюдали следы каонов при прохождении космических частиц через камеру Вильсона.

Лямбда-гиперон Λ . В 1951 году открыт в космических лучах с помощью все той же камеры Вильсона.

Сигма-гиперон Σ . Каскадный гиперон Ξ . Следы этих частиц наблюдали в камере Вильсона при работе с космическими лучами — в 1953 году. В следующем году они были обнаружены в реакциях на ускорителе протонов (космотроне) в Брукхейвене.

Антипротон \bar{p} . В 1928 году предсказан Дираком теоретически. В 1955 году Сегре и Чемберлен открыли антипротон в эксперименте на ускорителе (беватроне) в Беркли. Схема эксперимента — бомбардировка ядер бериллия протонами, ускоренными до 6 гигаэлектрон-вольт.

Антинейтрон \bar{n} . В 1956 году Пиччиони открыл эту античастицу при бомбардировке ядер бериллия протонами с беватрона.

Нейтрино ν . Его существование с необходимостью вытекало из объяснения спектра электронов при бета-распаде ядер (иначе нарушался закон сохранения энергии). К такому выводу пришел в 1930 году Паули.

Антинейтрино $\bar{\nu}$. Реакцию с участием антинейтрино ($\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$) в 1956 году наблюдали на реакторе Райнес и Коуен.

Нуклонный резонанс Δ . Баба и Гайтлер предсказали его существование еще в 1940 году. Однако открыт он был лишь в 1951 году Ферми в опытах по рассеянию пионов на протонах.

Гиперонные резонансы Λ^* , Σ^* , Ξ^* . Их существование предсказал в 1957 году Гелл-Ман на основе симметрии между тяжелыми частицами.

В 1960 году продукты их распада были обнаружены с помощью пузырьковой камеры в эксперименте на ускорителе.

Анти-сигма-минус-гиперон $\bar{\Sigma}^-$. Открыт в 1960 году в Дубне на синхрофазотроне с энергией протонов 10 гигаэлектронвольт.

Омега-минус-гиперон Ω^- . В 1961 году Гелл-Ман предсказал его существование на основе симметрии взаимодействия частиц и модели с кварками.

В 1964 году открыт на ускорителе в Брукхейвене в опытах по рассеянию К-мезонов с энергией 5 гигаэлектронвольт на протонах.

Мезонные резонансы ρ , ω . В 1953—1956 годах Хофштадтер (Стэнфорд) измерил угловое распределение электронов, рассеянных с энергией 550 мегаэлектронвольт на нуклонах.

В 1957 году Намбу и в 1959 году Фулко для объяснения этого распределения предположили существование резонансов в системах из двух и трех пионов, с массой около 800 мегаэлектронвольт.

В 1961 году такие резонансы наблюдались в распределении по массам двух и трех пионов в опыте в Беркли (бомбардировка водорода пионами или антипротонами с беватрона, экспериментальная установка — пузырьковая водородная камера).

Мезонные резонансы h и g . Открыты в опыте на ускорителе в Серпухове при бомбардировке протонов пионами. (1975-й и 1983-й годы соответственно).

Джи-дробь-пси-частица J/ψ . Открыта в 1974 году на ускорителе протонов в Брукхейвене и Стэнфорде (в опытах со встречными электрон-позитронными пучками).

Тау-лептон τ . В 1975 году эту частицу наблюдал Перл (Стэнфорд) в опыте со встречными электрон-позитронными пучками.

Ипсилон-резонанс Y . Открыт в 1976 году в распределении масс частиц — продуктов бомбардировки ядер бериллия протонами с энергией 400 гигаэлектронвольт (Батавия, автор открытия Ледерман).

Очарованные мезоны D , F . 1976 год, Стэнфорд. В опыте с регистрацией адронов при электрон-позитронных соударениях были открыты эти частицы.

Очарованные гипероны Λ_c , Σ_c . Открыты в 1975—1976 годах в Брукхейвене и ЦЕРНе (эксперименты на нейтринных пучках с использованием пузырьковых камер).

Промежуточные векторные бозоны W , Z . Их существование и свойства предсказали в 1959 году Глэшоу и в 1967 году Салам и Вайнберг (на основе единой теории электромагнитных и слабых взаимодействий).

В 1983 году (ЦЕРН) они были открыты в опытах по протон-антипротонным соударениям с энергией 2·270 гигаэлектронвольт (Руббиа и Ван-дер-Меер).

Литература

В. И. Ленин, КПСС о развитии науки (под общ. ред. К. М. Боголюбова). М., Политиздат, 1981.

Библиотека «Философия и современное естествознание». Вып. I—III. М., Знание, 1982 (В помощь лектору).

Вступительное слово президента АН СССР академика А. П. Александрова, доклад вице-президента АН СССР академика П. Н. Федосеева, выступления академиков М. А. Маркова, В. Л. Гинзбурга, В. А. Амбарцумяна, Н. Г. Басова, Ю. А. Овчинникова, А. А. Баева, Д. К. Беляева, Е. К. Федорова, А. В. Сидоренко, В. А. Энгельгардта, Б. М. Кедрова, Б. Е. Патона и других на III Всесоюзном совещании по философским вопросам современного естествознания. Составитель член-корреспондент АН СССР И. Т. Фролов.

Литература к отдельным главам

Глава 1

Андерсон Д. Открытие электрона. М., Атомиздат, 1968.

Емельянов В. С. Атом и мир. М., Атомиздат, 1967.

Корсунский М. И. Атомное ядро. М., Гостехиздат, 1951.

Сапожников М. Антимир — реальность? М., Знание, 1983.

Форд К. Мир элементарных частиц. М., Мир, 1965.

Щелкин К. И. Физика микромира. М., Атомиздат, 1965.

Глава 2

Бройль Л. де. Революция в физике. М., Атомиздат, 1965.

Месси Г. Новая эра в физике. М., Атомиздат, 1963.

Фейнман Р. Характер физических законов. М., Мир, 1968.

Глава 3

Зельдович Я. Б., Хлопов Ю. М. Масса нейтрино в физике элементарных частиц и космологии ранней Вселенной.— Успехи физических наук, 1981, т. 135, № 1.

Марков М. А. Нейтрино. М., Наука, 1964.

Глава 4

Белоусов А. С. Счетчики элементарных частиц. М., Наука, 1972.

Заневский Ю. В. Проволочные детекторы элементарных частиц. М., Атомиздат, 1978.

Росси Б., Штауб Г. Ионизационные камеры и счетчики. М., Гостехиздат, 1951.

Глава 5

Гольдн Л. Л. Физика ускорителей. М., Наука, 1983.

Минц А. Л. О кольцевых ускорителях протонов сверхвысоких энергий.— В сб.: Будущее науки, М., Знание, 1968.

Петросьянц А. М., Логунов А. А. Физика высоких энергий и ускорители заряженных частиц. М., Наука, 1973.

Глава 6

Дрелл С. Квантовая электродинамика и эксперимент. — Успехи физических наук, 1980, т. 130, № 3.

Нобелевские лекции Р. Фейнмана, Ю. Швингера, С. Томонага.— Успехи физических наук, 1967, т. 91, № 1.

Глава 7

Абов Ю. Г., Крупчицкий П. А. Нарушение пространственной четности в ядерных взаимодействиях.— Успехи физических наук, 1976, т. 118, № 1.

Окунь Л. Б. Лептоны и кварки. М., Наука, 1981.

Проблемы ядерной физики и физики элементарных частиц.— Сб. Памяти А. И. Алиханова. М., Наука, 1975.

Глава 8

Вайнберг С. Единые теории взаимодействия.— Успехи физических наук, 1976, т. 118, № 3.

Подольный Р. Нечто по имени ничто. М., Знание, 1983.

Фундаментальная структура материи. М., Мир, 1984.

Чирков Ю. Охота за кварками. М., Молодая гвардия, 1985.

Волошин М. Б., Тер-Мартirosян К. А. Теория калибровочных взаимодействий элементарных частиц. М., Энергоатомиздат, 1984.

Глава 9

Вайнберг С. Первые три минуты. М., Мир, 1981.

Силк Д. Большой взрыв. М., Мир, 1982.

Глава 10.

Березинский В. С., Зацепин Г. Т. Нейтринная астрофизика. М., Знание, 1975.

Большой подземный телескоп нейтринной обсерватории АН СССР.— Природа, 1978, № 4.

Лерид Д., Эйхлер Д. Глубоководный нейтринный телескоп.— Успехи физических наук, 1982, т. 137, № 3.

Глава 11

Астрофизика, кванты и теория относительности. М., Мир, 1982.

Марков М. А. О природе материи. М., Мир, 1976.

Рис М., Уилер Д. Черные дыры, гравитационные волны и космология. М., Мир, 1977.

ОГЛАВЛЕНИЕ

И. В. Чувило. Предисловие	3
ЧАСТЬ I. МИР ЧАСТИЦ	
Глава 1. Элементарные частицы — как это начиналось?	3
Дискретность вещества и электричества — 5; О фотоне — 8; О протоне и мезонах — 10; Античастицы — 10	
Глава 2. Свойства элементарных частиц	14
Движение частиц — 14; Век частиц — 16; Кванты и волны — 18; Особые приметы частиц — квантовые числа — 22; Преращения бесконечно малых — 24; Странность элементарных частиц — 30; Заряд тяжелых частиц — 31	
Глава 3. Нейтрино и заряд легчайших частиц	33
Открытие нейтрино — 33; Лептонный заряд — 37; Первые опыты с пучками нейтрино на ускорителе — 37; Мезонные фабрики и проверка закона сохранения лептонного заряда — 40; У нейтрино есть масса? — 42	
ЧАСТЬ II. НЕВИДИМКИ ОСТАВЛЯЮТ СЛЕДЫ	
Глава 4. Фотографирование элементарных частиц	44
Частицы ловят фотоэмульсия — 44; Туманная камера Вильсона — 44; Частицы кипятят жидкость — 46; Частица высекает искру — 52; Частицы вызывают вспышки — 53	
Глава 5. Невидимки можно ускорять	56
Ускорители элементарных частиц — 56; Крупнейший советский ускоритель — 61; Встречные пучки ускоренных частиц — 64	
ЧАСТЬ III. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ	
Глава 6. Электромагнитное взаимодействие заряженных частиц	68
Квантовая теория взаимодействия электронов с фотонами — 68; Диаграммы Фейнмана — 73; Современный эксперимент и квантовая электродинамика — 75; Загадка тяжелых родственников электрона — 75	
Глава 7. Слабое взаимодействие и распады	80
Нарушение симметрии в микромире — 80; Исследования советских физиков по несохранению четности — 88; Единство природы электромагнитных и слабых сил — 91	
Глава 8. Сильное взаимодействие элементарных частиц	95
Резонансные состояния частиц — 95; Глобальная симметрия и гиперонные резонансы — 100; Структура нуклона и первые мезонные резонансы — 102; Простейшая классификация сильно-	

взаимодействующих частиц — 105; Суперсемеяства адронов и предсказание новых частиц — 106; Кварк и эксперимент — 111; Развитие кварковой модели. Цветные кварки — 113; Очарованный кварк — 115; Открытие пси-частиц — 117; Открытие очарованных мезонов и гиперонов — 120; Открытие шиплон-резонанса со скрытой прелестью — 122; Дисперсионная теория сильного взаимодействия — 123

ЧАСТЬ IV. МИКРОМИР И МАКРОКОСМ

Глава 9. Стабильность мира под сомнением	131
В поисках распада протона — 131; О барьонной асимметрии Вселенной — 134	
Глава 10. Нейтрино и космос	137
Масса нейтрино и Вселенной — 137; Источники нейтрино во Вселенной — 139; Нейтрино от Солнца — 140; Нейтринные обсерватории под землей и под водой — 145	
Глава 11. В поисках гравитона	148
Электромагнитные волны — пример волнового процесса — 148; О тяготении и гравитационных волнах — 158; Гравитационное поле, пространство и время — 156; Современные опыты по проверке теории относительности — 159; Источники гравитационных волн в природе — 162; Поиски свидетелей космических катастроф — 166; Человек создает гравитоны в лаборатории — 169	
Перспективы	171
Новые проекты ускорителей — 171; Физический эксперимент и электроника — 174; Объединение всех сил природы — 178; Физика элементарных частиц и общество — 181	
Приложение	184
Как и когда были открыты основные элементарные частицы — 184; Литература — 188.	

Эдвард Иосифович Дубовой
ПО СЛЕДАМ НЕВИДИМОК

Главный отраслевой редактор *В. П. Демьянов*
Редактор *П. Ф. Яснопольский*
Мл. редактор *Н. А. Васильева*
Художник *А. Е. Григорьев*
Худож. редактор *М. А. Гусева*
Техн. редактор *Л. А. Солнцева*
Корректор *С. П. Ткаченко*

ИБ № 7031

Сдано в набор 28. 11. 84. Подписано к печати 14. 08. 85.
А 13815. Формат бумаги 84×109/32. Бумага тип. № 2. Гар-
нитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 10,08.
Усл. кр.-отг. 10,29. Уч.-изд. л. 10,56. Тираж 80 000 экз.
Заказ 4-533. Цена 30 коп. Издательство «Знание». 101835,
ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс за-
каза 857717.

Отпечатано с матриц Ордена Ленина комбината печат-
но-издательства «Радянська Україна» на Киевской книж-
ной фабрике 252054, г. Киев, ул. Воровского, 24.

Э.И. ДУБОВОЙ

30к.

ПО следам НЕВИДИМОК

Дубовой Эдвард Иосифович родился в 1941 году, кандидат физико-математических наук. Работает старшим научным сотрудником Радиотехнического института АН СССР. В специальных научных журналах («Ядерная физика», «Журнал экспериментальной и теоретической физики» и других) опубликовал (некоторые в соавторстве) более 90 работ. В 1979 году в Атомиздате вышла его научно-популярная книга «Таинственный мир элементарных частиц»

ЗНАНИЕ