
ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

СБОРНИК СТАТЕЙ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ» МОСКВА 1968

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
В. Д. БАРГЕР, Д. Б. КЛАЙН. <i>СТОЛКНОВЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ</i>	3
Х. Р. КРЕЙН <i>g-ФАКТОР ЭЛЕКТРОНА</i>	23
Р. ХАГЕДОРН, ЦЕРН, Женева <i>ПРИЧИННОСТЬ И ДИСПЕРСИОННЫЕ СООТНОШЕНИЯ</i> (Диалог на темы классической физики)	42

ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Сборник статей

Редактор *И. Б. Файнбойм*
Худож. редактор *Е. Е. Соколов*
Техн. редактор *Г. И. Качалова*
Корректор *Г. П. Ефименко*
Обложка *Л. П. Ромасенко*

2-3-7

Б.З. 61-6-68

Сдано в набор 30/VIII 1968 г. Подписано к печати 30/IX 1968 г.
Формат бумаги 60×90/16. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1,5.
Печ. л. 3,0. Уч.-изд. л. 2,84. Тираж 54 000 экз. Издательство «Знание».
Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4. Заказ 2510. Типография изд-ва
«Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4,
Цена 9 коп.

Столкновения элементарных частиц при высокой энергии¹

Среди известных современной физике микрообъектов, из которых состоит вещество, только наиболее тяжелые молекулы доступны непосредственному наблюдению с помощью электронного микроскопа. Для определения размеров и свойств более мелких объектов, таких, как атомы, ядра, элементарные частицы, приходится прибегать к косвенным экспериментальным методам. Для изучения фундаментальных частиц существует только один эксперимент, причем его можно варьировать почти в неограниченных пределах. Речь идет об эксперименте, при котором сталкиваются две частицы и затем исследуется то, что возникает в результате этого столкновения. Иногда частицы рассеиваются друг на друге так, как если бы они были бильярдными шарами, т. е. в результате взаимодействия они не изменяются. В других случаях взаимодействие приводит к сложным превращениям, вследствие которых сталкивающиеся частицы исчезают, но одновременно рождаются другие элементарные частицы.

Изучение этих явлений преследует две цели. Одна из них связана с поисками еще более фундаментальных составных частей, из которых построены те частицы, которые в настоящее время мы считаем элементарными. Другая состоит в стремлении более глубоко понять природу сил, определяющих поведение и взаимодействия элементарных частиц. Это необходимо не только для того, чтобы пополнить представления физиков о строении Вселенной, но также для того, чтобы ответить на вопрос о предельно возможной делимости вещества.

За последние 10 лет разработаны экспериментальные методы получения субъядерных частиц и изучения их свойств. Типичная последовательность операций, которые нужно выполнить для того, чтобы получить фундаментальные частицы

¹ В оригинале — аннотация: «Большая часть того, что физики знают о свойствах элементарных частиц, получена из экспериментов, при которых сталкиваются две такие частицы и изучаются продукты их взаимодействия».

в количестве, необходимом для изучения их свойств, показана на рис. 1. Прежде всего нужно создать источник достаточно большого количества протонов. Это достигается путем нагревания водорода до температуры, при которой происходит полная ионизация его атомов; получаются ядра-протоны, необходимые исследователю. Будучи заряжены, они ускоряются электрическим полем прямолинейно, а под действием магнитного поля начинают двигаться по кругу.

Используя совместное действие электрического и магнитного полей, можно на замкнутом круговом пути разогнать протоны до очень высоких энергий. Ускорители, работающие по этому принципу, позволяют получать протоны, энергия которых в 30 раз превышает их энергию покоя. (Энергия покоя и масса покоя частицы связаны формулой Эйнштейна $E=mc^2$). В единицах, общепринятых в физике элементарных частиц, энергия покоя протона равна приблизительно 1 млрд. эв. Затем протоны, которые ускорились до энергии в 30 млрд. эв, направляются на мишень, представляющую собой кусок какого-нибудь обыкновенного металла. В результате столкновения пучка протонов с мишенью образуются все известные элементарные частицы, которые вылетают из мишени с энергиями, заключенными в достаточно широком интервале.

Одной из наиболее часто рождающихся частиц является π -мезон, или пион.

В среднем каждый проваимодействовавший с мишенью протон выбивает из нее 4—5 пионов. Часть из них заряжена положительно, часть — отрицательно, остальные нейтральны. Если не считать заряда, то все положительные, отрицательные и нейтральные пионы обладают почти одинаковыми свойствами. Затем положительные и отрицательные пионы направляются на вторую мишень для изучения их взаимодействия с другими элементарными частицами. Эта мишень обычно представляет собой цилиндр диаметром порядка трех и высотой двух футов¹, наполненный жидким водородом, который поддерживается при температуре кипения (равной 0,27° выше абсолютного нуля). Можно считать, что жидкий водород состоит из свободных протонов. Когда заряженный пион проходит через эту камеру, выделяется теплота, в результате чего жидкий водород вблизи пиона закипает и образуются пузырьки. Поэтому такая мишень получила название пузырьковой камеры. Несмотря на то, что пион невероятно мал и абсолютно невидим, эти пузырьки дают возможность проследить его траекторию.

Заряженным частицам, которые рождаются в результате столкновения пиона с протоном, соответствуют в камере тон-

¹ 1 фут = 30,48 см.

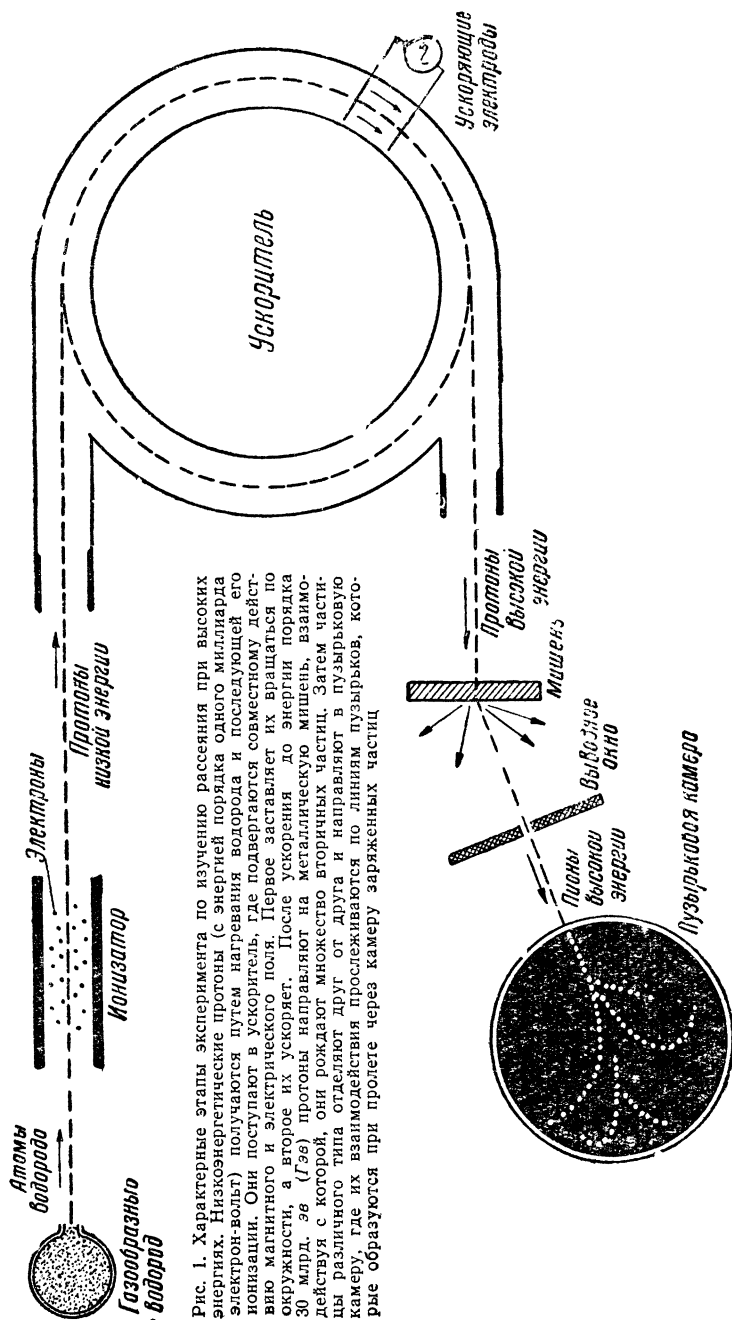


Рис. 1. Характерные этапы эксперимента по изучению рассеяния при высоких энергиях. Низкоэнергетические протоны (с энергией порядка одного миллиарда электрон-вольт) получают путем нагревания водорода и последующей его ионизации. Они поступают в ускоритель, где подвергаются совместному действию магнитного и электрического поля. Первое заставляет их вращаться по окружности, а второе их ускоряет. После ускорения до энергии порядка 30 млрд. эв (1 Гэв) протоны направляют на металлическую мишень, взаимодействуя с которой, они рождают множество вторичных частиц. Затем частицы различного типа отдают друг от друга и направляют в пузырьковую камеру, где их взаимодействия прослеживаются по линиям пузырьков, которые образуются при пролете через камеру заряженных частиц

кие линии, состоящие из пузырьков. Картина, которая возникает сразу же после столкновения, фотографируется. Таким образом фиксируется, как принято говорить, «событие». Возникшие в результате столкновения заряженные частицы движутся по криволинейным траекториям, так как пузырьковая камера помещается в магнитное поле. Кривизна траекторий позволяет определить импульс соответствующей частицы. В ходе эксперимента приходится отснять несколько сот тысяч фотографий для того, чтобы можно было отобрать из них несколько тысяч «событий» интересующего нас типа. Имея эти фотографии, физики могут приступить к изучению определенного типа взаимодействия между частицами.

Взаимодействие элементарных частиц подчиняется определенным законам сохранения, которые хорошо известны из других областей физики. В частности, при анализе процессов рассеяния частиц необходимо учитывать законы сохранения энергии, импульса и электрического заряда. Например, согласно закону сохранения энергии, полная энергия частиц до и после взаимодействия должна быть одинакова. Помимо электрического заряда, элементарные частицы могут обладать еще зарядом другого типа. Этот заряд назван барионным и он тоже абсолютно сохраняется: суммарный барионный заряд всех частиц до и после взаимодействия должен быть одинаков. Барионный заряд протона равен 1, а барионный заряд пиона — нулю.

Уверенность физиков в том, что полный барионный заряд сохраняется, крепнет с течением времени, поскольку никогда еще не наблюдалось ни одной реакции, в которой суммарный барионный заряд частиц, возникших после взаимодействия, отличался бы от суммарного барионного заряда частиц, присутствовавших до взаимодействия. Вооруженные этими эмпирическими законами сохранения, экспериментаторы получают возможность классифицировать и изучать множество процессов, происходящих при столкновении пионов высокой энергии с протонами внутри пузырьковой камеры.

Коль скоро установлено, что при взаимодействиях элементарных частиц высокой энергии выполняются общие законы сохранения, можно с уверенностью подойти к изучению основного вопроса о внутреннем механизме реакций, т. е. того, какие силы ответственны за эти сильные взаимодействия и чем обусловлены те изменения внешних и внутренних параметров частиц, к которым они приводят. Предполагаемый ответ на эти вопросы тесно связан с внутренней структурой частиц. Для того чтобы продолжить обсуждение этих вопросов, мы должны остановиться на некоторых фундаментальных теоретических идеях, определивших основное направление, которого придерживаются физики, изучая столкновения и структуру частиц.

Общепризнанный принцип, который лежит в основе современной теоретической физики, состоит в том, что можно рассматривать взаимодействия между элементарными частицами, считая, что они состоят из других элементарных частей. Например, протон можно рассматривать как частицу, состоящую из нейтрона и положительного пиона, которые находятся в связанном состоянии. Спонтанный распад протона на нейтрон и положительный π -мезон никогда не наблюдался в пузырьковой камере; такое событие нарушило бы закон сохранения энергии и импульса. Для доказательства того, что при этом распаде нарушается закон сохранения энергии, рассмотрим протон в состоянии покоя. Энергия частицы в состоянии покоя определяется ее массой покоя. Поскольку сумма масс нейтрона и пиона больше, чем масса покоя протона, при упомянутом распаде энергия сохраняться не может.

Почти все существующие теории опираются на предположение, что пионы могут находиться также и в «виртуальных» состояниях, причем в этом случае их массы отличаются от массы покоя «реального» пиона, который мы только и можем наблюдать в лабораторных условиях. Эти виртуальные пионы могут излучаться протоном без нарушения законов сохранения энергии и импульса. Однако в отличие от реальных пионов они не могут находиться вдали от протона и образовывать треки в пузырьковой камере. В рамках такого подхода масса пиона может изменяться непрерывно. Существование виртуальных пионов необходимо предположить для того, чтобы объяснить некоторые свойства элементарных частиц. Подобно молекулам, атомам и ядрам, элементарные частицы имеют определенный размер. Для протона этот размер обусловлен, в частности, облаком виртуальных мезонов, которые он постоянно излучает и вновь поглощает. Таким образом, размер и детальная внутренняя структура протона связаны с существованием виртуальных пионов.

Поскольку виртуальные пионы непосредственно не наблюдаемы, мы можем получать информацию об их свойствах, только изучая процессы рассеяния. Столкновение протона с нейтроном может быть описано как процесс, протекающий в две стадии с участием виртуального пиона. Сначала налетающий протон распадается на нейтрон и виртуальный пион. Затем, прежде чем вновь поглотиться этим нейтроном, он поглощается нейтроном-мишенью, в результате чего образуется протон в конечном состоянии. При таком столкновении протона с нейтронами энергия и импульс сохраняются на каждой стадии. Виртуальный пион можно рассматривать как некоторый агент, который переносит энергию и импульс от протона к нейтрону. Необходимо, чтобы при каждом столкновении, наряду с сохранением энергии и импульса, выпол-

нялись также все остальные законы сохранения. Предполагается, что не только пионы, но и все другие частицы могут находиться как в реальном, так и в виртуальных состояниях. Концепция о существовании виртуальных состояний лежит в основе наших представлений о взаимодействиях элементарных частиц.

Хотя при любых процессах рассеяния должны выполняться фундаментальные законы сохранения энергии и им-

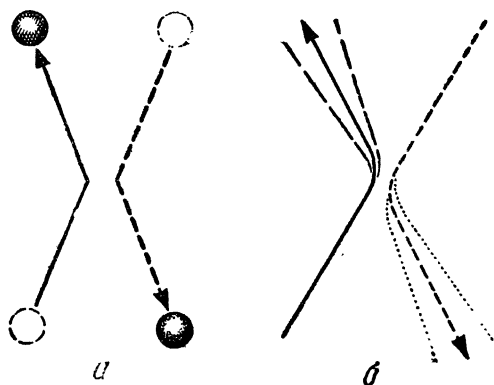


Рис. 2. Бильярдные шары и элементарные частицы рассеиваются по-разному. При рассеянии бильярдных шаров (а) их направления и скорости после столкновения можно определить точно, зная их направления и скорости в начальном состоянии. При каждом столкновении элементарных частиц (б) направления и скорости конечных продуктов не могут быть предсказаны точно. Можно только утверждать, что они должны быть такими, чтобы обязательно выполнялись законы сохранения энергии и импульса.

пульса, между рассеянием макроскопических объектов и рассеянием элементарных частиц существует коренное различие. При столкновении бильярдных шаров их относительное движение после рассеяния полностью определяется направлениями их движения и скоростями до рассеяния (рис. 2). При столкновениях же элементарных частиц никогда нельзя заранее точно предсказать, в каком состоянии они окажутся после рассеяния. Эта неоднозначность — следствие волновой природы элементарных частиц и теоретически описывается с помощью квантовой механики. Когда взаимодействие происходит в областях пространства порядка размеров элементарных частиц, теория может предсказать только вероятность того, что после соударения частицы будут находиться в некотором определенном состоянии. Поэтому теории, которые предсказывают свойства рассеяния элементарных частиц, не могут быть проверены наблюдением только одного акта

взаимодействия (например, фотографии одного события в пузырьковой камере). Для их проверки необходимо изучить большое количество событий рассеяния.

При столкновениях элементарных частиц существуют две возможности: либо в результате взаимодействия внутренняя структура частиц не изменяется (такие процессы называют упругим рассеянием), либо сталкивающиеся частицы при этом превращаются в две другие элементарные частицы (неупругое рассеяние). Простыми примерами этих двух основных типов рассеяния при взаимодействии пионов (π) с протонами (p) служат процессы $\pi^- + p \rightarrow \pi^- + p$ (упругое рассеяние) и $\pi^- + p \rightarrow \pi^- + n$ (неупругое рассеяние).

Мы откладываем на некоторое время обсуждение неупругих процессов, когда в конечном состоянии образуется много частиц. Хорошая теория элементарных частиц должна правильно предсказывать вероятность того, что соударение окажется упругим или же неупругим. В общем случае эти предсказания должны зависеть от энергии частиц и направления, в котором они рассеиваются. В некоторых случаях для того, чтобы сделать качественные предсказания свойств рассеяния, достаточно знать, какие частицы выполняют роль носителя взаимодействия при данном соударении.

Рассеяние элементарных частиц можно использовать и наоборот для изучения свойств виртуальной частицы, которой они обмениваются в процессе взаимодействия. Столкновение, в котором участвуют только две частицы, имеет два предельных случая: рассеяние вперед и рассеяние назад. При рассеянии вперед импульс и направление каждой из частиц почти не изменяются в результате столкновения. При рассеянии назад направление движения каждой из частиц меняется на почти противоположное.

Одним из самых значительных успехов на пути изучения свойств рассеяния элементарных частиц было успешное описание рассеяния вперед в рамках предположения об обмене виртуальным мезоном (например, виртуальным пионом), а рассеяния назад — посредством предположения, что взаимодействующие частицы обмениваются виртуальным барионом (например, виртуальным протоном или нейтроном).

Когда частицы взаимодействуют посредством обмена виртуальным пионом, они при столкновении только слегка касаются друг друга (рис. 3). Например, реакция $p + n \rightarrow p + n$ такого типа обусловлена обменом нейтральным виртуальным пионом. Поскольку взаимодействующие между собой протон и нейтрон значительно массивнее, чем сравнительно легкий виртуальный пион, такое столкновение можно сравнить с прохождением на параллельных путях навстречу друг другу двух тяжелых платформ, с одной из которых при встрече перебрасывается на другую мешок с песком. Ясно,

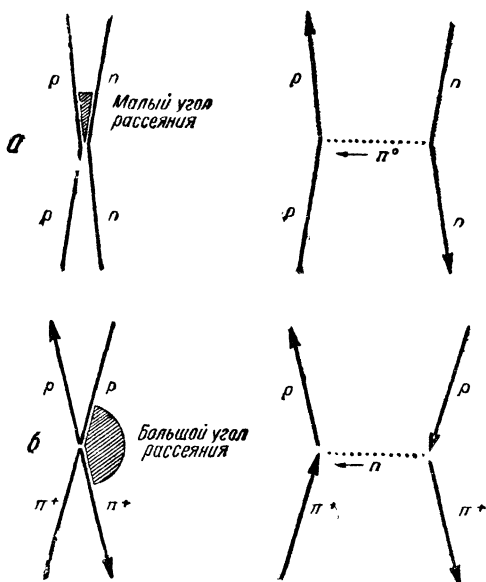


Рис. 3. Угол рассеяния зависит от того, какой виртуальной частицей обменялись реальные частицы при взаимодействии. Если при столкновении протона с нейтроном (а) между ними произошел обмен π -мезоном, то угол рассеяния должен быть мал (преимущественное рассеяние вперед). Для столкновения π -мезоном и протоном (б), которое обусловлено обменом виртуальным нейтроном, характерны большие углы рассеяния (преимущественное рассеяние назад).

что в результате такого взаимодействия в подавляющем большинстве случаев налетающий протон (или нейтрон) только слегка изменяет свое первоначальное направление. Следовательно, угол между направлениями протона до и после столкновения (называемый углом рассеяния), обусловленного обменом виртуальным пионом, должен быть очень мал. Если нарисовать для типичного процесса такого типа график зависимости вероятности рассеяния от угла рассеяния при высокой энергии сталкивающихся частиц, то становится очевидным, что заметно отличается от нуля только вероятность рассеяния вперед и под малыми углами (рис. 4).

При рассеянии, обусловленном обменом виртуальным протоном или нейтроном, ситуация менее прозрачна. В качестве простого примера такого рассеяния можно рассмотреть реакцию $\pi^+ + p \rightarrow p + \pi^+$, которая сопровождается обменом виртуальным нейтроном. В этом случае первоначальное направление движения пиона и направление движения протона после столкновения почти совпадают. Другими словами,

угол между направлениями полета протонов в начальном и конечном состояниях весьма велик. При взаимодействиях такого типа заметно отличается от нуля только вероятность рассеяния назад и под большими углами.

Гипотезу о существовании и роли виртуальных частиц можно непосредственно экспериментально проверить. Определив пути частиц по фотоснимкам конкретных столкновений в пузырьковой камере, физик вычерчивает кривую зависимости числа наблюдавшихся событий от угла рассеяния. Сравнивая эти экспериментальные кривые с теоретическими предсказаниями для распределения вероятности, он может определить, чем было обусловлено взаимодействие: обменом виртуальным мезоном или же виртуальным барионом. При некоторых взаимодействиях события группируются вблизи направлений вперед и назад, что указывает на присутствие как столкновений между частицами, обусловленных обменом виртуальным мезоном, так и столкновений, обусловленных обменом виртуальным барионом. При других взаимодействиях большинство событий группируется только вблизи на-

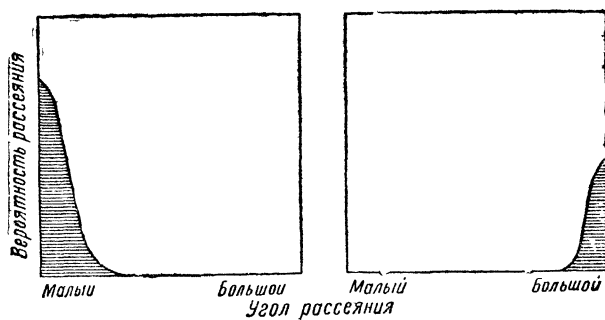


Рис. 4. Вероятность рассеяния в общем случае зависит от того, какой виртуальной частицей — мезоном или барионом — обменялись реальные частицы при взаимодействии. Обмен виртуальным мезоном приводит к большой вероятности рассеяния только под малыми углами (рис. слева), а обмен виртуальным барионом — к большой вероятности рассеяния только под большими углами (рис. справа). При некоторых процессах рассеяния (например, $\pi^+p \rightarrow \pi^+p$) вероятность рассеяния имеет максимумы как вперед, так и назад, что указывает на возможность обмена как виртуальным мезоном так и виртуальным барионом.

правления вперед или же только вблизи направления назад. Присутствие или отсутствие таких максимумов может быть истолковано как существование или отсутствие соответствующих виртуальных частиц, которые могут быть ответственны за это взаимодействие. Но, поскольку реальные частицы,

в свою очередь, имеют прямое отношение к виртуальным (можно рассматривать реальную частицу как частный случай виртуальной), с максимумами рассеяния вперед или назад связана непосредственная информация о существовании или отсутствии соответствующих реальных частиц. Оказалось, что предсказанная теорией качественная связь между максимумом рассеяния вперед и назад, с одной стороны, и частицами, которые действительно были обнаружены, с другой, находится в полном согласии с экспериментальными данными.

Среди первых открытий на пути изучения природы элементарных частиц одно из наиболее интересных заключалось в установлении того факта, что каждая частица обязательно имеет определенный внутренний спин. Это означает, что элементарная частица ведет себя, подобно вращающему волчку. Основным свойством, общим для вращающегося волчка и элементарной частицы, является то, что они обладают угловым моментом. Различие между ними состоит в том, что угловой момент вращающегося волчка связан простым соотношением с его размерами и частотой вращения, а элементарную частицу нельзя рассматривать просто как объект, который вращается вокруг некоторой оси. И тем не менее каждой частице соответствует определенный внутренний спиновый угловой момент. Наличие у частиц внутреннего спина было обнаружено уже довольно давно и определение этого спина является обычной составной частью экспериментальных исследований. Пока что нет никакого интуитивного объяснения причины того, что элементарные частицы обладают внутренним спином.

Для частицы определенного сорта величина внутреннего спинового углового момента всегда одна и та же. Более того, внутренние спины различных частиц всегда могут быть выражены соответствующим образом через фундаментальную единицу спина, подобно тому как заряды частиц всегда представляют собой определенную сумму единичных зарядов. В этой шкале спины нейтрона и протона равны $\frac{1}{2}$, а спин пиона равен нулю. Фактически, все элементарные частицы можно подразделить на два класса: фермионы — частицы с полуцелыми спинами ($\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{5}{2}$ и т. д.), и бозоны — частицы, которые обладают целым спином (0, 1, 2, 3, и т. д.).

Естественно, возникает вопрос, могут ли значения спинового углового момента виртуальных частиц пробегать непрерывный спектр значений подобно тому, как может непрерывно изменяться их масса. В последние годы исследования в этой области привели к многообещающему продвижению на пути изучения свойств взаимодействия элементарных частиц при высоких энергиях.

Теоретические исследования, связанные с одновремен-

ным рассмотрением непрерывного спектра масс и спинов виртуальных частиц, радикально изменили наши представления об элементарных частицах. Эта новая теория вскрыла глубокую связь между спином и массой частицы, независимо от того, будет ли эта частица реальной или виртуальной. Микроскопическую аналогию этой связи между спином и массой можно проследить на примере вращающегося волчка. С вращением волчка связана определенная энергия вращения и, следовательно, согласно формуле Эйнштейна, определенная дополнительная масса, которая тем больше, чем больше скорость вращения. В то же время с увеличением скорости вращения волчка возрастает и его угловой момент. Таким образом, эффективная масса возрастает по мере увеличения спина. Аналогичная, хотя и значительно менее прозрачная связь существует между эффективной массой и спином реальных и виртуальных частиц. Она графически иллюстрируется рис. 5. Этот график (его обычно называют диаграммой Чу-Фрауччи) содержит важнейшую информацию и играет первостепенную роль при изучении элементарных частиц.

Диаграмма Чу-Фрауччи представляет собой обобщение связи между реальными и виртуальными частицами. В качестве конкретного примера рассмотрим соответствующую диаграмму, описывающую реальные и виртуальные состояния протона. Каждая точка, лежащая на линии, идущей по диагонали, которая называется траекторией Редже протона, соответствует определенному состоянию протона. Протон в том состоянии, которое мы наблюдаем, фотографируя треки в пузырьковой камере, обладает спином, равным $\frac{1}{2}$, и массой, которой соответствует энергия порядка миллиарда электрон-вольт, и, следовательно, лежит на траектории в точке с этими координатами.

Одно из наиболее интересных свойств траектории, описывающей зависимость между спином и массой, связано с теми ее точками, которые расположены правее точки, соответствующей реальному протону. При продолжении в эту область траектория проходит через другие положительные полуцелые значения спина (например, $\frac{3}{2}$, $\frac{5}{2}$, $\frac{7}{2}$ и т. д.), которыми также могут характеризоваться наблюдаемые фермионы. В действительности, из предсказаний теории следует, что только частицы со спинами $\frac{1}{2}$, $\frac{5}{2}$, $\frac{9}{2}$ и т. д. могут лежать на траектории протона (как обычно говорят, быть членами протонного семейства частиц). Таким образом, помимо протона со спином, равным $\frac{1}{2}$, теория предсказывает существование последовательности частиц со все возрастающими значениями масс и спинов. Прямым подтверждением этих предсказаний послужил недавно обнаруженный в эксперименте ряд первых членов этих семейств частиц.

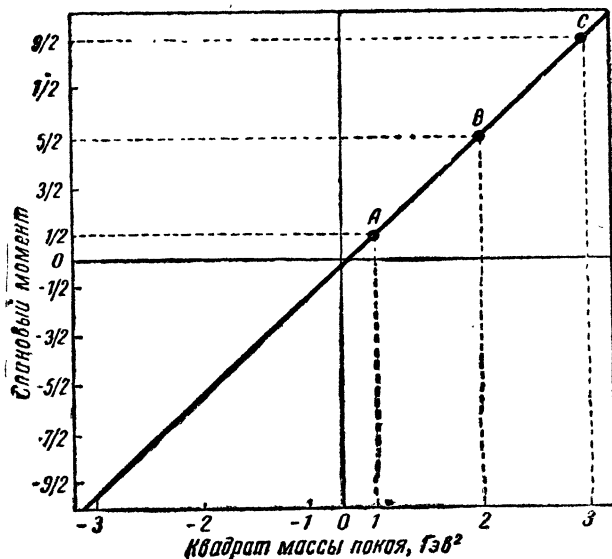


Рис. 5. Диаграмма Чу-Фрауччи для протонного семейства частиц иллюстрирует связь между спином и массой реальных и виртуальных частиц. Реальные частицы, которые были обнаружены в пузырьковых камерах, обозначены черными точками. Протон (р) обладает спином $1/2$ и массой покоя, соответствующей энергии, равной 1 Гэв . Наблюдаемые частицы (В, С) называют резонансами. Их спины равны $5/2$, $3/2$ и т. д. Каждая точка на диагональной линии, называемой траекторией Редже, соответствует возможному состоянию частиц из протонного семейства. Точки траектории, лежащие в нижнем левом квадрате, соответствуют виртуальным состояниям, которые переносят взаимодействие при столкновении реальных частиц.

С каждым годом число изученных элементарных частиц возрастает. В настоящее время многие из них уже удалось классифицировать по семействам. Если траектории Редже продолжают и далее вправо и вверх, то возможно, что в действительности в каждом семействе окажется бесконечно много частиц. Насколько нам в настоящее время известно, каждый член семейства является в одинаковой степени элементарной частицей. Таким образом, протон ничем не выделен, кроме того, что он имеет наименьшую массу в ряду протоноподобных частиц. Мнение о том, что протон занимает исключительное положение среди элементарных частиц, теперь должно быть пересмотрено, подобно тому, как несколько веков назад было развенчано учение, согласно которому Земля считалась центром Вселенной.

Теория предсказывает, что должны существовать также

аналогичные семейства мезонов. Согласно этому пион, обладающий нулевым спином, следует считать легчайшим членом семейства пионов со спинами, равными 0, 2, 4 и т. д. Многие из известных в настоящее время мезонов действительно оказались членами подобных семейств.

Может случиться, что в одном семействе окажется много элементарных частиц. В духе проведенного нами рассмотрения процессов рассеяния следовало бы считать, что каждая из этих элементарных частиц может находиться в виртуальном состоянии и, следовательно, переносить взаимодействие при столкновениях частиц. К счастью, обобщение гипотезы о существовании и роли виртуальных частиц, которое включает в рассмотрение виртуальный спин, заменяет необходимость учета вкладов во взаимодействие, обусловленных об-менами каждым из членов семейства. По существу, оно позволяет рассматривать вклад сразу всех частиц семейства как вклад, обусловленный обменом одной частицей, обладающей как виртуальной массой, так и виртуальным спином. Каждая точка траектории, которая на диаграмме Чу-Фрауччи для протонного семейства расположена левее нулевого значения виртуальной массы, описывает вклад сразу всего этого семейства во взаимодействие при столкновении элементарных частиц.

Гипотеза о частицах с виртуальным спином уже нашла подтверждение, благодаря успешной классификации множества элементарных частиц по упомянутым выше семействам. Едва ли не самое прямое подтверждение этой гипотезы было получено на основе изучения рассеяния элементарных частиц при высоких энергиях.

Вероятность рассеяния двух частиц зависит как от угла рассеяния, так и от полной энергии налетающей частицы. Как уже отмечено, зависимость вероятности рассеяния от угла непосредственно связана с типом виртуальных частиц, которыми могут обмениваться взаимодействующие частицы при столкновении: обмен виртуальным мезоном приводит к преимущественному рассеянию вперед, в то время как обмен виртуальным барионом вызывает в основном рассеяние назад.

Из данных экспериментов по рассеянию частиц можно извлечь также и другую важную информацию. В частности, можно использовать зависимость рассеяния от полной энергии налетающей частицы. Теория предсказывает, что при фиксированном значении квадрата массы виртуальной частицы, которой обмениваются взаимодействующие элементарные частицы, убывание вероятности рассеяния с ростом энергии определяется величиной виртуального спина этой частицы. Чем меньше этот виртуальный спин, тем с меньшей вероятностью должна рассеиваться налетающая по мере увеличе-

ния энергии. Таким образом, определяя по траектории Редже соответствующую величину виртуального спина, теория позволяет предсказать зависимость вероятности рассеяния от энергии. Эти предсказания были экспериментально проверены и нашли подтверждение в экспериментальных данных по рассеянию элементарных частиц при высоких энергиях.

Теория частиц с виртуальной массой и виртуальным спином позволяет на единой основе описывать процессы рассеяния при высоких энергиях и классифицировать элементарные частицы по семействам. Связующим звеном этих двух, казалось бы, совершенно разных аспектов теории элементарных частиц является траектории Редже. Общая согласованность предсказанной теорией связи между свойствами рассеяния и семействами частиц подтверждает гипотезу, согласно которой все элементарные частицы построены друг из друга и в природе не существует подразделения вещества на объекты, более мелкие, чем элементарные частицы. Однако необходимо подчеркнуть, что не все физики разделяют эту точку зрения. В дальнейшем мы коснемся альтернативных взглядов, которые связаны с возможным существованием материальных объектов («кирпичиков», из которых построено вещество), еще более фундаментальных, чем элементарные частицы).

Перспектива дать последовательное объяснение всех экспериментальных данных о бинарных¹ процессах рассеяния частиц при высоких энергиях на языке обмена ограниченным числом виртуальных частиц является для физиков очень заманчивой. Не меньший интерес представляет собой объяснение интерференционных явлений, обнаруженных недавно при экспериментальном изучении рассеяния элементарных частиц при энергиях, несколько меньших, чем те, к которым относилось все изложенное выше. Эти интерференционные явления обнаруживают себя в виде флуктуаций вероятности рассеяния, которые возникают при уменьшении энергии налетающих частиц. Подобные интерференционные эффекты хорошо известны в атомной и ядерной физике. Пример такой интерференции при рассеянии элементарных частиц показан на рис. 6. Пунктирная кривая соответствует вероятности рассеяния, если оно обусловлено обменом виртуальными частицами. При достаточно высоких энергиях все состояние определяется этим обменом. Однако при уменьшении энергии налетающей частицы начинает играть роль новое явление и экспериментально измеряемую вероятность рассеяния уже нельзя удовлетворительно объяснить вкладом от обмена виртуальной частицей.

¹ Бинарными называются процессы, которые характеризуются тем, что в начальном и конечном состояниях присутствует только по две частицы. (Прим. перев.).

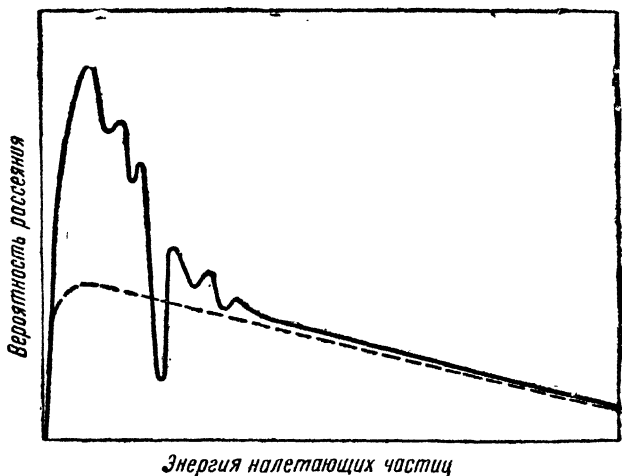


Рис. 6. Интерференционная картина, которая наблюдается при рассеянии элементарных частиц в области более низких энергий. Она проявляется в виде флуктуаций вероятности рассеяния (сплошная кривая) по мере уменьшения энергии. Пухтирская кривая соответствует вероятности рассеяния, обусловленного только обменом виртуальными частицами. При больших энергиях этим механизмом можно удовлетворительно описать все взаимодействие. Авторы полагают, что флуктуации, возникающие при уменьшении энергии, обусловлены взаимодействием двух механизмов рассеяния: обмена виртуальными частицами и образования и последующего распада резонансных состояний.

Мы интерпретируем эти интерференционные явления как взаимодействие двух различных физических механизмов рассеяния, одним из которых является обмен виртуальной частицей. Другой механизм становится существенным только при более низких энергиях и связан с образованием возбужденных состояний частицы. Этот механизм можно наглядно представить себе, если рассматривать сталкивающиеся частицы как пластилиновые шарики. При столкновении они слипаются на очень короткое время, в течение которого всю систему можно считать резонансной частицей. Затем эта резонансная частица распадается на частицы, образующиеся в результате взаимодействия. Диаграмма образования и распада резонансных состояний показана на рис. 7. Частицы должны выступать в роли промежуточных резонансных состояний в процессе рассеяния, если только при этом выполняются все основные законы сохранения.

График вероятности рассеяния показывает, что два упомянутых механизма взаимодействия могут приводить как к конструктивной, так и к деструктивной интерференции. По-

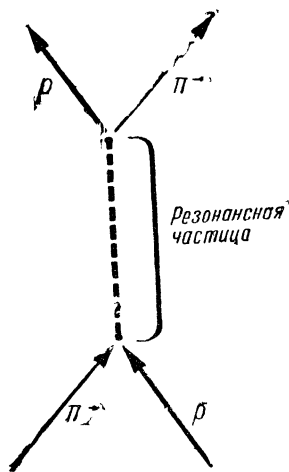


Рис. 7. Резонансная частица представляет собой временное слияние двух столкнувшихся частиц. В приведенном примере упругого π - p -разсеяния пион и протон слипаются, образуя резонансное состояние, которое через время порядка 10^{-23} сек распадается на пион и протон в конечном состоянии.

ложения максимумов и минимумов связаны с массами резонансных состояний, образующихся при столкновении частиц. Частицы, соответствующие этим резонансным состояниям (резонансные частицы), входят в те самые семейства, которые обсуждались выше.

Изучение интерференционных явлений служит многообещающим методом для разрешения загадки спектра масс элементарных частиц и составления каталога всех характеристик резонансных частиц. Более того, успешное объяснение запутанной картины интерференционных явлений такого рода оказывает нам значительную помощь на пути установления тесной внутренней связи между рассеянием и спектром масс элементарных частиц.

Число частиц, которые могут образоваться в результате столкновения пиона с протоном в пузырьковой камере, ограничено только величиной полной энергии налетающего пиона и покоящегося протона. Поэтому при достаточно высокой энергии взаимодействия в конечном состоянии может оказаться много различных частиц. В частности, ничтожная часть энергетически разрешенных реакций при π - p -столкновениях приведена в табл. 1.

Таблица 1

$$\pi^- + p \rightarrow \begin{cases} \pi^- + p \\ \pi^0 + n \\ \pi^- + \pi^0 + p \\ \pi^- + \pi^- + \pi^+ + p \\ K^0 + \Lambda^0 \\ K^+ + \Sigma^- \\ \pi^- + K^+ + \Lambda^0 \end{cases}$$

Среди всех вариантов взаимодействия существует также такой, когда мезон, пролетая через пузырьковую камеру, вообще не провзаимодействует ни с одним протоном. Ясно, что сумма вероятностей всех возможных взаимодействий (включая отсутствие взаимодействия) равна единице. Вероятность того, что π -мезон действительно провзаимодействует хотя бы с одним протоном, называется полной вероятностью рассеяния.

Ввиду значительной сложности реакций, в результате которых в конечном состоянии образуется три или более частиц, современная теория не в состоянии достаточно определенно предсказать каждую из таких реакций в отдельности. В то же время простейшим свойством, характеризующим сразу всю совокупность процессов с большим числом частиц в конечном состоянии, является полная вероятность рассеяния.

Основная теорема теории рассеяния, известная под названием оптической теоремы, связывает полную вероятность рассеяния с вероятностью упругого рассеяния вперед. Следовательно, теоретические предсказания свойств упругого рассеяния вперед, основанные на представлениях об обмене виртуальным мезоном, относятся в равной степени и к полной вероятности рассеяния. Значение виртуального спина, которое на траектории Редже соответствует нулевому значению массы этого виртуального мезона, определяет при высоких энергиях поведение вероятности упругого рассеяния вперед и, следовательно, полную вероятность рассеяния. Таким образом, виртуальный спин, задаваемый траекторией Редже, определяет энергетическую зависимость полной вероятности рассеяния.

Недавно в Национальной Брукхевенской лаборатории (США) были выполнены весьма точные эксперименты по измерению полной вероятности рассеяния при π^-p - и π^+p -соударениях вплоть до максимальной энергии, которая доступна современным ускорителям (26 Гэв). Найденную в результате этих экспериментов энергетическую зависимость можно успешно описать в рамках гипотезы об обмене виртуальными мезонами. Полученные экспериментальные данные указывают на две замечательные тенденции.

Первая из них указывает на то, что при неограниченном увеличении энергии полная вероятность рассеяния, возможно, будет стремиться к постоянному предельному значению (меньшему единицы), хотя, учитывая огромное число многочастичных конечных состояний, которые становятся допустимыми по мере роста энергии, интуитивно можно было бы ожидать, что она должна расти. Если полная вероятность рассеяния действительно не растет вместе с энергией, то это должно означать, что она определяется обменом мезоном,

имеющим виртуальный спин, равный единице. Хотя некоторые из известных в настоящее время реальных мезонов, возможно, и лежат на той же траектории, что и виртуальная частица со спином, равным единице, и массой, равной нулю, утверждать это с достаточной определенностью пока что нельзя.

Вторая тенденция, вытекающая из результатов, полученных в Брукхевене, состоит в том, что значения полных вероятностей рассеяния при π^-p - и π^+p -взаимодействиях с ростом энергии сближаются. Снова интуиция не могла бы привести нас к подобному выводу, поскольку при этих двух типах столкновений реализуются разные конечные состояния. Однако предположение о существовании одной траектории, на которой лежит частица с виртуальным спином, равным единице, и виртуальной массой, равной нулю, позволяет предсказать, что при ультравысоких энергиях полные вероятности π^-p - и π^+p -рассеяния должны стать одинаковыми.

Современное состояние эксперимента и теории указывает на то, что, быть может, мы находимся на пороге кардинального скачка на пути изучения взаимодействий элементарных частиц. Для дальнейшей проверки правильности изложенных выше идей, необходимо определить полную вероятность рассеяния в области более высоких энергий. Возможно, что завершение строительства гигантского ускорителя на 200 Гэв в США и постройка ускорителя на 300 Гэв, запланированная в Европе, позволят сделать этот решающий шаг. В течение следующего десятилетия мы сможем получить на этих машинах богатый экспериментальный материал.

Сейчас возникли две точки зрения относительно дальнейшей делимости элементарных частиц на пока еще неизвестные составные части. Одна из теоретических интерпретаций была выдвинута профессорами Гелл-Маном и Цвейгом из Калифорнийского технологического института. Они предположили, что все элементарные частицы построены из шести компонент — трех «кварков» и трех «антикварков». В отличие от всех известных частиц кварки и антикварки должны обладать электрическим и барионным зарядами, равными одной или двум третям соответствующих зарядов протона. В этой схеме протон должен состоять из трех кварков, а пион — из одного кварка и одного антикварка. Физики-экспериментаторы предприняли активные поиски кварков среди частиц, возникающих в результате столкновений при высоких энергиях. Однако на этом пути пока не достигнуто положительных результатов. Если бы протон представлял собой систему из трех слабо связанных кварков, то масса каждого из них была бы равна трети массы протона. Однако частицы с такой массой, по-видимому, должны были

бы при современных ускорительных энергиях рождаться в большом количестве. В действительности же экспериментально установлено, что масса кварка не может быть меньше утроенной массы протона. Если протон состоит из трех таких массивных кварков, то энергия их связи должна быть необычайно велика. Такая ситуация была бы весьма неожиданной с точки зрения всей предыдущей истории исследования микромира, так как до сих пор при образовании связанного состояния энергия связи всегда была значительно меньше, чем масса этого состояния.

Одно из интересных теоретических предсказаний гипотезы кварков имеет отношение к полной вероятности рассеяния элементарных частиц при высоких энергиях. Механизм упругого рассеяния вперед в рамках этой гипотезы схематически иллюстрируется рисунком на обложке брошюры. В этом случае столкновение элементарных частиц надлежит рассматривать как сумму всевозможных упругих соударений пар кварков или антикварков (при этом предполагается, что при достаточно высокой энергии кварки и антикварки взаимодействуют одинаково). Такая модель приводит к очень интересному предсказанию о том, что отношение полной вероятности pp -взаимодействия к полной вероятности $p\bar{p}$ -взаимодействия должно при достаточно высокой энергии быть равно $2/3$. Современные экспериментальные данные по взаимодействию при высокой энергии дают для соответствующих вероятностей отношение как раз такого порядка. Это замечательное соотношение рассматривается некоторыми физиками как доказательство кварковой структуры элементарных частиц.

Альтернативная точка зрения заключается в том, что продвижение в глубь строения вещества кончается на элементарных частицах в современном понимании этого слова. Полная непротиворечивость описания элементарных частиц как состоящих друг из друга может рассматриваться как указание на то, что это действительно так. Эта глубокая философская концепция, принадлежащая профессору Дж. Чу из Калифорнийского университета в Беркли, основана на предположении, что все элементарные частицы являются одинаково фундаментальными, т. е. на предположении о подлинном равноправии всех элементарных частиц.

В настоящее время есть две причины для оправдания этой точки зрения. Во-первых, то обстоятельство, что протон лежит на той же траектории, что и многие другие частицы, дает основание предполагать, что он не более фундаментален, чем другие члены протонного семейства. По-видимому, аналогичное утверждение относится и к мезонам. Во-вторых, успешное описание взаимодействий при высоких энергиях с помощью известных нам частиц делает правдоподобной гипотезу

тезу, согласно которой обмен этими частицами ответствен за те силы, которыми обусловлено существование самих наблюдаемых частиц.

Мы связываем большие надежды на окончательный выбор между двумя упомянутыми точками зрения с дальнейшим изучением взаимодействия элементарных частиц при очень высоких энергиях. На ближайшие десятилетия перво-степенная задача физики состоит в том, чтобы выяснить, какой путь в действительности выбрала природа: кварки или же равноправие элементарных частиц?



g -фактор электрона¹

Когда мы в 1950 году начинали ставить свои эксперименты с целью определения g -фактора электрона, то, конечно, не могли даже представить себе, что семнадцатью годами позже мы все еще будем продолжать эти эксперименты.

С точки зрения исторического описания этой работы интересно отметить обстоятельства, вынудившие нас начать ее, те изменения, которые приходилось делать в устройствах по мере продвижения к цели, и то, что все это удалось осуществить совсем не так, как мы планировали вначале, а намного лучше.

g -фактор — это величина, которой можно охарактеризовать любой вращающийся объект с магнитным моментом, направленным параллельно оси вращения. Если вращающийся объект, обладающий такими свойствами, поместить во внешнее магнитное поле, то он начнет «прецессировать» подобно вращающемуся волчку или гироскопу, т. е. его ось вращения будет медленно двигаться, описывая конус. Частота прецессии зависит от произведения двух сомножителей: напряженности внешнего магнитного поля и отношения магнитного момента объекта к его угловому моменту вращения. (Угловой момент вращения объекта характеризует «количество» вращения. Например, в случае колеса он будет зависеть от скорости вращения, массы колеса и от характера распределения этой массы по радиусу колеса).

Тогда как внешнее магнитное поле находится в распоряжении экспериментатора и может быть выбрано, в принципе сколь угодно сильным, отношение, о котором я только что упомянул (отношение магнитного момента к угловому моменту), есть свойство самого вращающегося объекта. Это отношение обладает строго заданной величиной для электрона и абсолютно одинаково для каждого электрона во Вселенной. Для других частиц (например, протонов) это отно-

¹ В оригинале — аннотация: «Так называется отношение магнитного момента электрона к его спиновому угловому моменту. Его численная величина представляет значительный интерес. Точное измерение g -фактора позволило сделать далеко идущие выводы».

шение будет, вообще говоря, другой, но тоже строго заданной величиной. Поскольку при интерпретации весьма многочисленных явлений достаточно знать только эти отношения для разных частиц (а не угловой и магнитный моменты по отдельности), то измерения их с высокой степенью точности стали предметом интенсивных исследований. Это отношение называется g -фактором частицы.

Пока я только лишь сказал, почему g -факторы частиц представляют такой интерес, однако я не дал еще ни малейшего намека на то, почему именно g -фактор электрона играл столь существенную роль в нескольких важных революционных переменах в физике. Чтобы сделать это, мне придется вернуться более чем на 50 лет назад и начать с рассказа о выдвинутой Нильсом Бором оригинальной модели атома водорода.

Боровская модель оказалась исключительно успешной при описании линий в спектре атома водорода. Однако вскоре стало очевидным, что спектры атомов с более высокими атомными номерами обладают некоторыми усложнениями, для объяснения которых приходится вводить новые числа (называемые квантовыми числами), которые не содержались в первоначальной модели. Особенно четко это проявилось на примере «аномального эффекта Зеемана» в атомах щелочных металлов (например, таких, как атомы лития и натрия).

Голландский физик Питер Зееман показал, что в том случае, когда атомы, испускающие свет, помещены в магнитное поле, нормальные линии расщепляются на несколько линий, которые хотя и лежат очень близко друг к другу, но все же весьма четко отделены друг от друга. Если бы магнитное поле просто немножко сдвинуло бы длины волн этих линий в ту или иную сторону, то это ни у кого не вызвало бы удивления. В конце концов электрон, вращающийся по орбите вокруг атомного ядра, вполне эквивалентен току, текущему по замкнутому проволочному кольцу. Такой кольцевой ток приводит к возникновению магнитного момента или, если угодно, к появлению северного и южного полюсов. Соответственно этому было бы разумным ожидать, что внешнее магнитное поле будет как-то изменять электронные орбиты. Но тот факт, что при наложении магнитного поля отдельные линии расщепляются на две или более разных линий, не мог быть вообще понят в рамках модели Бора.

Именно это загадочное явление заставило двух молодых голландских физиков, Самуэля А. Гаудсмита и Георга Э. Уленбека, постулировать в 1925 году, что электрон обладает своими собственными угловым и магнитным моментами. Недавно в своей речи в Американском физическом обществе Гаудсмит сказал, что именно он пришел к заключению, что

дополнительное квантовое число, необходимое для описания наблюдаемой структуры спектров, возможно должно быть связано с электроном, тогда как Уленбек увидел, что новое свойство должно быть по своей природе эквивалентно внутреннему угловому моменту. Так родилась концепция спина электрона.

Наличие у электрона собственного магнитного момента неразрывно связано с идеей о существовании его собственного углового момента. Любое заряженное тело, вращающееся вокруг своей оси, должно обладать собственным магнитным моментом. Это нетрудно понять из простой аналогии с замкнутым кольцевым током.

Это была смелая гипотеза, которая естественно не была принята сразу же и безоговорочно. Наличие спина приводило к новому квантовому числу, необходимому для объяснения наблюдаемого расщепления линий в спектрах. Подбирая значения углового и магнитного моментов электрона так, чтобы объяснить результаты экспериментов по аномальному эффекту Зеемана, Гаудсмит и Уленбек обнаружили исключительно простое соотношение.

Внутренний угловой момент электрона должен был быть равным точно половине углового момента, обусловленного орбитальным движением электрона на нижней боровской орбите в атоме водорода, т. е. $\hbar/2$, где \hbar обозначает постоянную Планка (h), деленную на 2π . Внутренний магнитный момент должен был быть равным магнитному моменту, обусловленному орбитальным движением электрона на нижней боровской орбите в атоме водорода. Эта величина, называемая магнетон Бора, равна $eh/2mc$, где e и m обозначают соответственно заряд и массу электрона, а c есть скорость света.

Таким образом, в те времена, когда был открыт спин электрона, g -фактор электрона можно было бы выразить как отношение магнитного момента в «естественных единицах» ($eh/2mc$) к угловому моменту в «естественных единицах» (\hbar). Будучи определен таким образом, g -фактор для орбитального движения электрона, находящегося в наинизшем энергетическом состоянии в атоме водорода, равен единице, тогда как g -фактор свободного электрона равен двум. (g -фактор был введен несколькими годами ранее немецким физиком Альфредом Ланде для описания атомных спектров как термин, обозначающий отношение магнитного момента к угловому моменту в этих специальных единицах.)

Поскольку не было никаких оснований сомневаться в правильности указанных выше соотношений, то в течение двадцати лет они не вызывали каких бы то ни было возражений. В физике всегда имеются достаточно веские причины для того, чтобы предполагать, что простые соотношения вер-

ны, если, конечно, не доказано обратное. Многие из таких соотношений действительно оказываются верными. Для многих физиков именно в этом и состоит красота и внутреннее совершенство теории. Наиболее сильную поддержку вера в точность значения 2 для g -фактора электрона получила в конце двадцатых годов, когда П. А. М. Дирак дал новую формулировку квантовой механики.

В своих работах Дирак не «вводил извне» g -фактор, равный 2, в качестве требования какой-либо модели электрона. Он использовал только основные физические законы (включая и принцип относительности) в сочетании с простым набором дополнительных условий и таким способом естественно получил величину g -фактора.

Однако в послевоенные годы в этом вопросе произошли некоторые изменения. В течение нескольких лет удалось существенно продвинуться как в области эксперимента, так и в области теории, что привело к созданию так называемой новой квантовой электродинамики. Центральная задача всей этой деятельности состояла в учете взаимодействия электрона с окружающим его пустым пространством, или, как говорят физики, с «вакуумом».

Если кому-либо представляется странным говорить о том, что пустое пространство может каким-то образом влиять на электрон, то это происходит лишь потому, что обычно термин «пустое пространство» понимают в обычном смысле как пространство, в котором нет каких бы то ни было «больших» объектов, таких, например, как молекулы газа. Однако с точки зрения субатомного мира пустое пространство отнюдь не означает отсутствие каких бы то ни было свойств. Там могут рождаться и аннигилировать электронно-позитронные пары, а также пары частиц других сортов, могут иметь место локальные флуктуации электрического и магнитного полей и, конечно, может распространяться излучаемая энергия.

Когда в рамках новой квантовой электродинамики удалось достаточно точно учесть влияние пустого пространства на электрон, то оказалось, что величина g -фактора слегка превышает 2. Само по себе изменение в величине g -фактора не звучит чересчур поразительно. Но связанные с этим изменения были настолько глубоки, что пятерым физикам, сделавшим наибольший вклад в эту область, были присуждены Нобелевские премии Уиллису Лембу и Поликарпу Кашу в 1955 году (за экспериментальные исследования) и Юлиану Швингеру, Ричарду Фейнману и Син-Итиро Томонаге в 1965 году (за теоретические исследования).

Конечно, невозможно проследить детально за ходом развития этой области, если не посвящать этому всю статью. Однако я бы хотел сделать ряд небольших замечаний. Ис-

пользование термина «новая квантовая электродинамика» не означает, что существующая теория была отброшена и заменена новой теорией. Скорее наоборот — новая теория была расширением существующей теории, которая оказалась неспособной учесть взаимодействие частиц с вакуумом. Теоретики пытались сделать это, но всегда получали формулы, содержащие бесконечные величины, от которых не удавалось избавиться с помощью известных тогда теоретических методов. Поэтому состояние дел казалось крайне неопределенным. Однако как только внезапно появились экспериментальные результаты, которые не согласовались с существующей теорией, и были сообщены некоторые числа, с которыми можно было сравнивать варианты теории, прогресс в этой области стал весьма заметным.

Оказалось, что тот путь, который был предложен ранее для устранения бесконечностей, приводит к ответам, согласующимся с экспериментом. Но используемые методы еще не могли не вызывать некоторого сомнения. Например, как отметил Дирак несколько позже в *Scientific American* (май 1963), он не мог рассматривать решение проблемы бесконечности иначе как счастливую случайность. Я полагаю, что при этом он имел в виду, что тот метод, который, очевидно, оказался хорошо применим к данным конкретным приложениям, все еще остается под вопросом с точки зрения его общности.

Таково было состояние дел в 1950 году, когда мы приступили к измерениям g -фактора. Вокруг этого вопроса было заметно некоторое оживление. Новая теория приводила к g -фактору электрона, большему 2 примерно на 0,1%. Имелись некоторые экспериментальные результаты, которые в пределах довольно скромной точности измерений находились в согласии с этим значением. Поскольку новая теория базировалась на не совсем привычных методах, ее принятие или неприятие покоились на чисто прагматической основе. Измерение g -фактора с более высокой степенью точности было бы не просто еще одной обычной проверкой, а служило бы критической проверкой новой теории. Если бы в этот момент мы поставили наши эксперименты с целью получить ответ на этот вопрос, то вся последовательность событий выглядела бы так, как должно было быть. Но мы подошли не таким простым путем, а как бы пятась назад. Я опишу подробнее, как все это происходило.

В 1946 году мы занялись проектированием и постройкой одного из крупнейших электронных ускорителей того времени. По мере работы возникли задачи, которые следовало решить. Над проектом работали аспиранты, которые, естественно, должны были решать диссертационные проблемы и защищать свои диссертации, не дожидаясь, когда синхротрон начнет работать. Одним из них был Уильям Х. Луисел.

Роберт В. Пидд один из нескольких профессоров, имевших отношение к проекту ускорителя, был председателем аспирантской комиссии, а я был ее членом. Мы решили попытаться поставить диссертационную задачу так, чтобы для ее решения не нужен был весь синхротрон, а только те его части, которые уже были разработаны к тому времени. Одной из них была «электронная пушка», вакуумная труба с высоким напряжением, которая обеспечивала интенсивный пучок электронов с энергиями до 600 000 эв. Она была предназначена для того, чтобы инжектировать электроны в синхротрон, где они затем ускорялись до энергии 300 млн. эв.

Перед тем как заняться постройкой синхротрона, мы вместе с Пиддом интересовались поляризационными эффектами в электронных пучках, изучая их с помощью экспериментов по двойному рассеянию. Мы думали, что электронная пушка сооружаемого синхротрона окажется идеальным инструментом для проведения таких экспериментов. Соответственно этому мы привели наши интересы в соответствие с доступными к тому времени экспериментальными устройствами и предложили Луиселу диссертационную тему.

Здесь я хотел бы сделать небольшое отступление, чтобы рассказать о двойном рассеянии. Эта методика оказалась не только важной для проведения наших экспериментов, но и вообще находит широкое применение в физике. Спины электронов, испускаемых нагретой металлической нитью, направлены совершенно беспорядочно в пространстве. Если часть этих электронов ускоряется и собирается в виде пучка, то, как говорят, такой пучок является неполяризованным. Для того чтобы поляризовать пучок, совсем не нужно повертывать электроны так, чтобы они были направлены своими «северными полюсами» в одну и ту же сторону. В действительности мы даже не знаем, как это можно сделать. Если в вашем распоряжении находится достаточно много электронов, то нужно только придумать такой сортирующий механизм, чтобы оставить лишь те электроны, спины которых направлены в одну сторону, и отбросить все остальные. Мы знаем, как провести такую сортировку. Забавно, что для получения наблюдаемого эффекта нам придется сделать эту сортировку дважды. Отсюда и термин — «двойное рассеяние».

Я использую простую аналогию, чтобы показать, почему необходима двойная сортировка. Предположим, что мы сделали 1000 маленьких карточек. На 500 из них написано «Поворачивай всегда направо», а на остальных 500 карточках написано «Поворачивай всегда налево». Мы смешиваем карточки и даем по одной каждому из 1000 мотоциклистов, которые согласились принять участие в эксперименте. Каждый из них читает, что написано на его карточке, кладет ее

в свой карман и затем все вместе принимают старт. Может ли посторонний наблюдатель у первой же развилки дороги заметить какой-либо эффект, который можно было бы приписать заранее прочитанным карточкам? Нет. Он видит только, что по каждой из дорог после первой развилки едет по 500 мотоциклистов, что могло произойти и совершенно случайно. Этому наблюдателю надо подождать до второй развилки, чтобы определить, что же происходит. Эффект оказывается весьма драматическим. Те мотоциклисты, которые двинулись по правой дороге у первой развилки, вновь все вместе повернут направо у второй развилки. Точно так же все, ехавшие по другой дороге, повернут налево. На языке теории рассеяния электронов первая развилка называется поляризатором, вторая — анализатором. Наблюдатель не имеет наглядного доказательства того, что сортировка была произведена до тех пор, пока мотоциклисты не прошли анализатор (рис. 1).

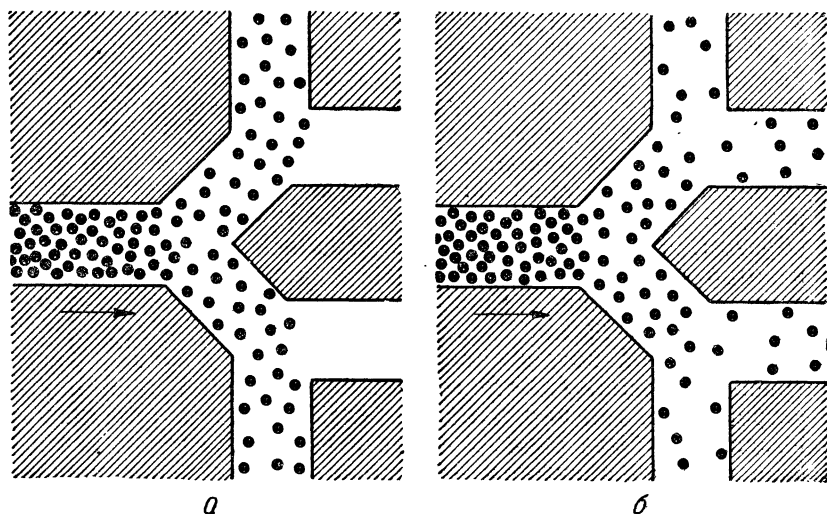


Рис. 1. Использование двойного рассеяния является основой наших экспериментов по измерению g -фактора.

У электрона нет карточки, но он может быть повернут «северным полюсом» вверх или вниз, а, следовательно, может принадлежать к одному классу или к другому. Если пучок электронов проходит через тонкую пластинку из какого-либо вещества, скажем, через золотую фольгу, то электроны будут отклоняться вправо или влево. Указанные два класса электронов (с северными полюсами вверх или вниз) окажутся рассортированными точно так же, как мотоциклисты на первой развилке дороги, но этот факт еще не будет не-

посредственно наблюдаемым. Необходимо еще раз повторить рассеяние правого или левого пучка для того, чтобы сделать наблюдаемым эффект сортировки. Когда электроны проходят через вторую золотую фольгу и при этом рассеиваются — на этот раз уже по-разному вправо и влево, — то при наилучших условиях это различие составляет только около 6%. Сортировка оказывается не столь хорошей, как это было в нашем примере с мотоциклистами, однако она достаточно хороша для того, чтобы поставить эксперименты.

Теория двойного рассеяния электронов была разработана Н. Ф. Моттом в 1929 году. Этот процесс известен под его именем. Сейчас нам кажется очень удивительным тот факт, что понадобилось около шести лет для того, чтобы предсказанный теоретически эффект удалось наблюдать на эксперименте. Даже к 1950 году, когда Луисел приступил к изучению этого явления, имелось очень мало количественных данных об этом эффекте. Именно поэтому исследование двойного рассеяния электрона представлялось нам хорошей темой для диссертационной работы.

Инжектор синхротрона, который надо было использовать как источник электронов, находился в основном синхротронном зале. Когда инжектор работал, то возникало множество помех вследствие сильного рентгеновского излучения, которые, как мы уже знали, препятствуют детектированию и счету электронов, претерпевших двойное рассеяние. Поэтому мы решили разместить экспериментальное оборудование таким образом, чтобы электроны рассеивались во второй раз на некотором удалении от инжектора, а именно в следующем зале, расположенном от инжектора на расстоянии около 30 футов (около 10 м). Электроны двигались туда внутри трубы, в которой поддерживался достаточно хороший вакуум (рис. 2). Возможно, что мы чересчур перестарались с этим устройством, так как толщина бетонной стены, разделявшей помещения, была около 3 футов и в ней уже имелось отверстие как раз в нужном нам месте. Но установка казалась нам идеальной. Однако когда труба была установлена, откачана и мы провели первые опыты, то оказалось, что слишком мало электронов доходило до второй фольги просто вследствие того, что электронный пучок становился слишком «веерообразным» на длине около 30 футов между двумя мишенями.

Стандартный метод фокусировки электронов вдоль оси трубы состоит в наложении внешнего магнитного поля, параллельно этой оси. Для этого нужно всего лишь намотать провода вокруг трубы и пустить по ним ток. Чтобы сохранить электроны, я решил поступить именно таким образом, но тут же спохватился и спросил себя: «А как будет влиять магнитное поле на поляризацию электронов?» (Ведь элект-

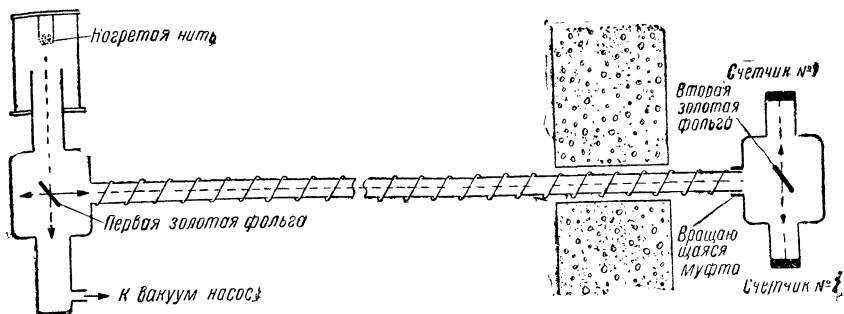


Рис. 2. Оригинальная аппаратура, построенная автором и его коллегами в Мичиганском университете, была предназначена для изучения поляризации (или степени параллельного выстраивания) осей спинов электронов в пучке электронов высокой энергии с помощью двойного рассеяния.

роны, двигавшиеся вдоль трубы, были поляризованы в результате рассеяния на первой мишени).

Довольно легко понять, что если электроны ведут себя подобно маленьким вращающимся магнитам, то воздействие на них магнитного поля будет приводить к медленной прецессии их осей вращения. (Точно так же прецессирует ось вращающегося волчка). Когда электроны достигнут второй мишени, то направления их спинов могут уже отличаться от тех, которые были бы в отсутствии магнитного поля.

Нам было ясно, что, если такая прецессия действительно имеет место и можно зарегистрировать изменение направления спина, то нам удастся определить величину магнитного момента намного точнее, чем мы надеялись вначале.

Но верно ли, что электроны ведут себя именно таким образом? Механические модели могут служить весьма наглядными иллюстрациями (некоторые из физиков — в том числе и я — просто не могут обойтись без них). Однако всегда надо быть предельно осторожным, как только дело касается микроскопических объектов, где становятся существенными квантовые эффекты. В этом случае каждый раз надо проверять, не противоречит ли модель основным принципам квантовой теории. Именно по этому поводу наши коллеги-теоретики зажигали перед нами предостерегающие желтые огни — и не без оснований.

Хотя механическая модель вращающегося электрона и вызывает серьезные подозрения, однако она обладает рядом весьма привлекательных черт, которые я хотел бы описать здесь. Модель вращающегося электрона, построенная простейшим способом, оказывается, приводит к g -фактору, рав-

ному 2, т. е. точно совпадающему с g -фактором электрона, вытекающим из уравнения Дирака.

Возьмите любой твердый цилиндр правильной формы, например пробку от бутылки, и проткните его вдоль оси зубочисткой (рис. 3). Затем нанесите отрицательный электрический заряд на поверхность цилиндра, оставив его торцы незаряженными. Отношение заряда к массе пробки должно быть точно таким же, как отношение заряда электрона к его массе. Если пробку вращать вокруг зубочистки, то заряд,двигающийся по кругу, можно рассматривать как пеглю с током, что и приводит к появлению магнитного момента (рис. 3,а). Помимо того, вращающаяся пробка обладает угловым моментом вращения. В рассматриваемой модели отношение магнитного момента к угловому моменту равно e/mc (что и приводит к g -фактору, равному 2) независимо ни от скорости вращения, ни от размеров пробки (в частности, от отношения ее длины к диаметру). Может показаться, что еще более простой моделью был бы заряженный пробковый шарик, но в этом случае g -фактор не был бы равен 2.

В нашей модели пробка ведет себя как гироскоп. Пусть ось ее вращения направлена вертикально. Толкнем слегка

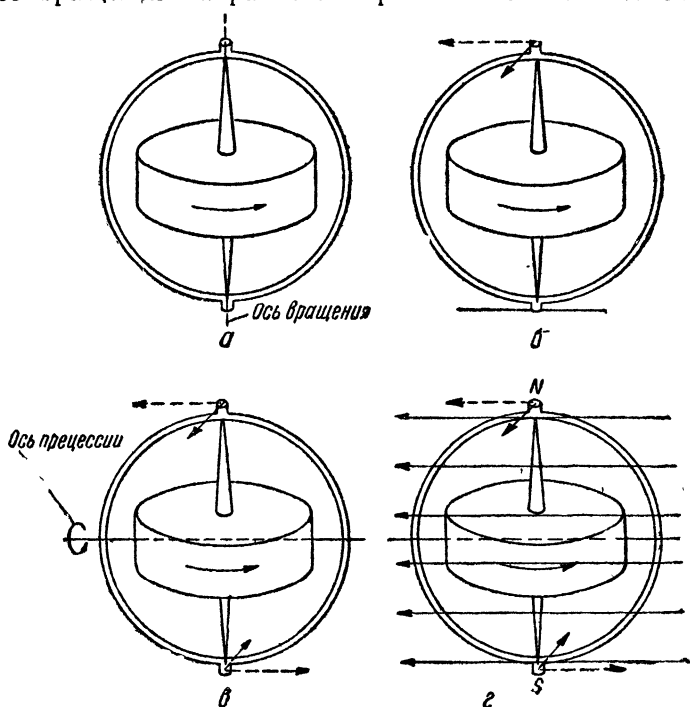


Рис. 3. Модель вращающегося электрона.

конец зубочистки вбок. Она не станет двигаться в этом направлении, а пойдет точно по перпендикуляру к направлению, в котором действует приложенная сила (рис. 3,б). Если вращение происходит без каких-либо помех и мы прикладываем к разным концам зубочистки силы, равные по величине, но противоположные по направлению, действующие соответственно слева и справа, то один из концов зубочистки начнет двигаться вперед по направлению к нам, а другой — назад от нас, (рис. 3,в). Таким образом, концы зубочистки опишут несколько оборотов по кругу. Именно это вращение оси (в отличие от вращения самой пробки) и называется прецессией. Концы зубочистки никогда не движутся в том направлении, в котором их толкают.

Если вращающийся магнит поместить в магнитное поле, то на его северный и южный полюса будут действовать вдоль силовых линий противоположно направленные силы (рис. 3,г). Ось вращения будет поворачиваться так же, как у гироскопа. Число полных оборотов оси в секунду пропорционально g -фактору и напряженности приложенного поля. В установке, использованной Луиселом, ось вращения должна была совершать около пяти полных оборотов за то время, пока электроны двигались вдоль 30-футовой трубы. Ему оставалось только измерить точно число оборотов, чтобы определить g -фактор, если, конечно, эксперимент вообще окажется удачным. У многих физиков имелись веские возражения против этого.

Сомнения в том, что наш эксперимент удастся осуществить, базировались на некоторых соображениях, высказанных Бором в его лекции в 1920 году. В то время считалось, что в принципе возможны только два эксперимента, с помощью которых можно было бы попытаться обнаружить магнитный момент свободного электрона. Один из них состоял в детектировании магнитного поля электрона непосредственно с помощью чувствительного магнетометра. В другом эксперименте надо было рассортировать электроны соответственно ориентациям их магнитных моментов, пропуская электронный пучок через неоднородное магнитное поле.

Бор показал, что обе эти возможности не осуществимы практически, если учесть принцип неопределенности Гейзенберга, суть которого состоит в том, что имеется естественное ограничение на ту точность, с которой одновременно могут быть известны координаты и импульс частицы. Оказалось, что в обоих случаях для того, чтобы измерить магнитный момент электрона, надо было измерять координату и импульс частицы с точностью большей, нежели принципиально допустимая.

Вычисления Бора могли бы уместиться на обратной стр.

роне конверта, настолько они были просты и недвусмысленны. Ошибка заключалась не в тех доказательствах, которые приводил Бор, а в тех чересчур решительных обобщениях, которые были позднее сделаны другими физиками из этих доказательств. Суть этих обобщений состояла в том, что вследствие принципа неопределенности ни один эксперимент по непосредственному измерению магнитного момента свободного электрона не мог рассчитывать на успех.

Это утверждение вошло в учебники и, можно сказать, стало своего рода религиозным убеждением. Когда же, более чем через два десятилетия, мы предложили эксперимент по измерению прецессии свободного электрона, для осуществления которого не требовалось одновременно знать положение и импульс частицы с точностью, нарушающей пределы, налагаемые соотношением неопределенности, то мы столкнулись именно с этой старой верой в то, что ни одному эксперименту в этой области не может сопутствовать удача.

За то время, пока Луисел подготавливал свой эксперимент, мы поняли, что число полных оборотов оси во время прецессии при пролете электрона в 30-футовой трубе оказывается чересчур малым. Оно будет равно только пяти. Однако если бы мы захотели получить намного большее число оборотов, просто удлиняя трубу, то она вскоре протянулась бы до соседнего города. Мне удалось придумать такое изменение всей установки, которое позволило бы преодолеть это ограничение. Но это предназначалось уже не для эксперимента Луисела — его едва ли можно было уговорить начать все сначала, а для последующего опыта и следующего аспиранта. В новой схеме используется то, что обычно называют магнитной бутылкой (рис. 4). Правильной аналогией в действительности здесь могла бы служить бутылка с горлышками на каждом из концов, поскольку магнитная бутылка образована магнитным полем, которое сильнее на концах нежели в середине, так что силовые линии уплотняются там, образуя нечто вроде двух горлышек.

Частица, попавшая в такую ловушку, движется примерно по окружности вокруг оси симметрии этого поля. На самом деле движение происходит не по замкнутой круговой орбите, а по винтовой линии, где витки уложены плотно друг к другу. Частица медленно передвигается вдоль оси то в одном направлении, то в другом, пытаясь выйти то через одно горлышко, то через другое. Однако она всегда возвращается назад к центру ловушки, так как равнодействующая всех сил, направленных под прямым углом к силовым линиям, действует в сторону центра бутылки. При такой схеме эксперимента электронная пушка и первый рассеиватель помещаются так, чтобы электроны, отклоненные на 90° в рассеивателе, попадали в магнитную ловушку точно под тем на-

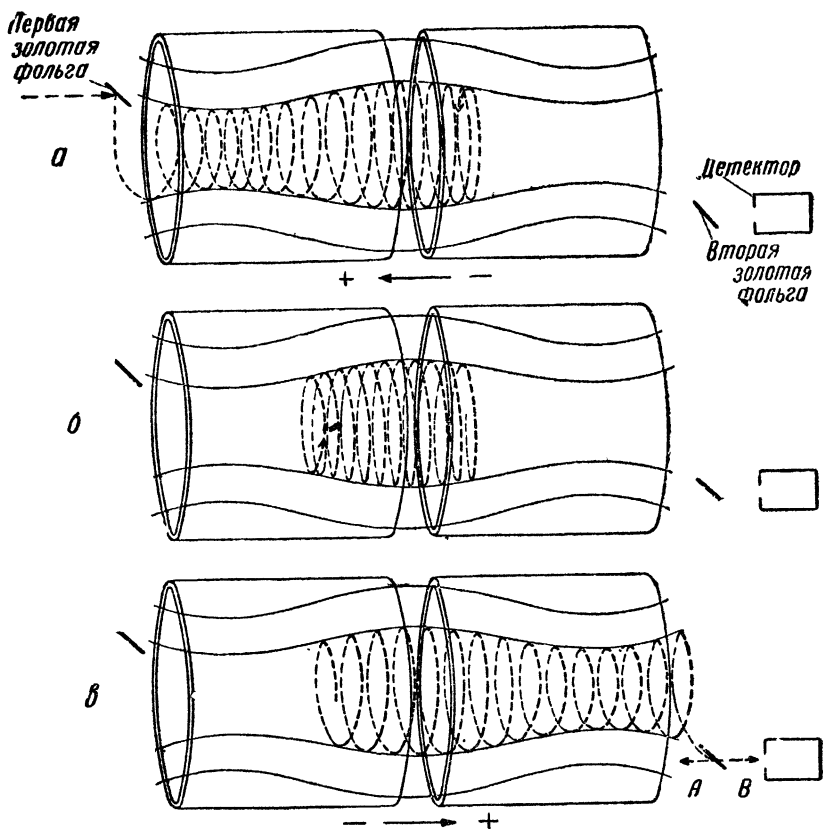


Рис. 4. Магнитная ловушка используется в эксперименте по измерению g -фактора электрона.

правлением, которое необходимо для последующего движения по винтовой линии.

Поймать электроны в ловушку, затем выпустить их и пропустить через анализатор к последнему счетчику не столь просто, как это кажется с первого взгляда. Все эти события разворачиваются за время порядка 100 мксек (миллионных долей секунды) (см. рис. 4). Прежде всего из электронной пушки за время около 1 мксек вылетает поток электронов, которые сталкиваются с первым рассеивателем, представляющим собой пластинку из золотой фольги. Около 10 миллиардов электронов попадает на рассеиватель. Из них только около 100 000 отклоняются ядрами золота точно в том направлении, которое необходимо для того, чтобы электроны попали в магнитную бутылку и двигались там по винтовой линии (рис. 4, *а*),

Здесь возникает проблема удержания этих 100 000 электронов в ловушке. Эта задача не из легких, поскольку электроны, скорость которых достаточно велика для того, чтобы войти в бутылку через горлышко, смогут естественно по той же причине выйти из горлышек бутылки на том или ином конце ее и оказаться таким образом потерянными для следующей стадии опыта. Поэтому надо уменьшить скорость электронов, как только они попадут внутрь ловушки. С этой целью мы тормозим их с помощью электрического поля, направленного вдоль оси бутылки, которое прикладывается как только электронный пучок в первый раз проходит через центр бутылки. Так как скорость электронов уменьшается, то они уже не выходят на другом конце бутылки, а поворачивают там и идут назад к тому концу, где они вошли. Как раз в момент поворота электрическое поле выключается и поэтому при обратном движении электроны не набирают той скорости, которую они потеряли вначале. Следовательно, электроны уже не могут выйти из ловушки и удерживаются в ней. С этого момента они движутся по винтовой линии с плотно уложенными витками внутри бутылки, медленно передвигаясь от одного конца ее к другому и обратно (рис. 4,б).

Продержав электроны в заточении столь долго, сколько это нам необходимо, мы снова прикладываем электрическое поле, но на этот раз уже в таком направлении, чтобы они ускорялись в ту сторону, где у конца бутылки стоит второй рассеиватель. Они легко проходят через горлышко бутылки и, совершив еще несколько оборотов вдоль винтовой линии, сталкиваются с золотой фольгой (второй мишенью) (рис. 4,в). При этом число электронов, которые рассеиваются в нужном направлении, снова составляет очень малую долю от числа столкнувшихся с золотой фольгой. Если все 100 000 электронов, которые были в ловушке, сталкиваются с фольгой, то только один (или в среднем даже меньше, чем один) электрон рассеивается на такой угол, чтобы попасть в счетчик.

Все это может выглядеть весьма неэффективным и так это и есть на самом деле, но весь цикл, который я только что описал, повторяется примерно несколькими сотням отсчетов в секунду. Конечно, все это работает автоматически с помощью электронных устройств. Можно было бы добавить, что электрон, удерживаемый в такой системе в течение 100 мксек, прецессирует столько же, сколько оборотов он совершил бы, двигаясь по прямой вдоль трубы длиной шесть миль!

Кроме увеличения числа оборотов, за время прецессии у новой схемы постановки опыта имеется еще одно важное преимущество. Оно состоит в том, что, прецессируя, спид

совершает почти полный оборот за то время, пока электрон проходит один виток при движении по винтовой линии. Если бы g -фактор был равен точно 2, то спин совершал бы тоже точно один оборот. Поэтому нам остается только измерить малое отличие между периодами этих вращений для того, чтобы найти, насколько g -фактор отличается от 2. Таким способом мы получаем намного большую точность, чем при измерении самой скорости прецессии спина. Дело в том, что различие между периодами вращения составляет всего лишь тысячные доли от самого периода прецессии.

Чтобы понять, к чему приводит сочетание двух вращений, рассмотрим состояния электрона в различные моменты времени после того, как он попал в магнитную ловушку (рис. 5). Из-за отбора, проведенного на первом рассеивателе, спины электронов, которые начинают двигаться по винтовой линии, направлены наружу по радиусу, перпендикулярно общей оси винтовой линии и магнитной ловушки. Так как периоды обоих вращений, в которых участвует каждый электрон, примерно равны, то стрелка, указывающая направление спина, поворачивается за время первого оборота на орбите так, как будто она нарисована на ободе вращающегося колеса.

Однако через несколько сот оборотов поворот направления спина относительно траектории орбитального движения становится заметным. Спин уже не направлен по радиусу. Направление спина продолжает постепенно изменяться. Примерно через 1000 оборотов спин совершает полный оборот относительно орбиты электрона и вновь направлен вдоль своего первоначального направления. Очевидно,

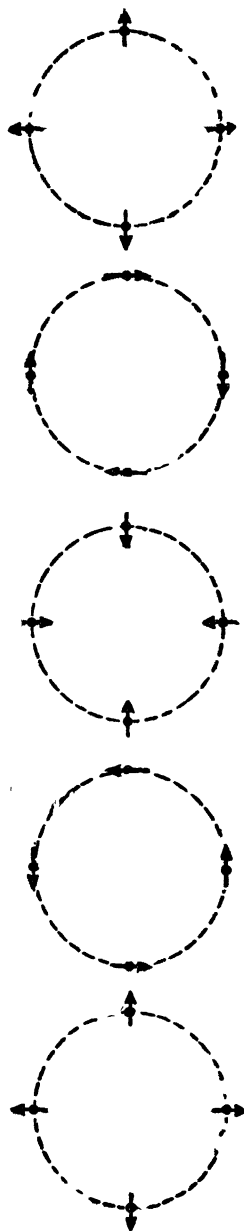


Рис. 5. Направление спинов (указано стрелками) при движении электрона по винтовой линии (указано кругами). Цифры означают число витков, пройденных электроном.

что спины электронов, выпущенных из ловушки примерно через 1000, 2000 или 3000 оборотов, будут ориентированы точно так же, как вначале, тогда как спины электронов, выпущенных после 500, 1500 или 2500 оборотов, окажутся ориентированными в противоположном направлении.

После того как электроны выпущены из ловушки, они сталкиваются со вторым рассеивателем (который также сделан из золотой фольги). Вероятность рассеивания электрона вдоль заданного направления зависит от ориентации его спина. На эксперименте ведется подсчет только тех электронов, которые движутся вдоль некоторого выбранного направления. Скорость счета попеременно меняется от максимальной до минимальной, когда число оборотов равно соответственно 0, 500, 1000, 1500 и так далее. (Я намеренно использовал здесь круглые цифры лишь в качестве иллюстрации. На самом деле максимумы и минимумы расположены не при таких числах оборотов. Определение их точных положений и представляет собой цель всего эксперимента). В действительности мы хотим определить положение максимумов и минимумов как функций продолжительности времени, которое электрон проводит в магнитной ловушке, а не в зависимости от количества совершенных им орбитальных оборотов. Конечно, и тот и другой путь приведет к искомому результату. Просто более удобно все выразить в терминах времени, проведенного электроном в ловушке.

Выше я упомянул, что время, в течение которого электрон удерживается в ловушке, может быть сделано сколь угодно большим в зависимости от нашего желания. Предположим, что мы настроили электронную схему таким образом, чтобы каждый инжектированный внутрь пучок электронов удерживался в ловушке в течение 100 *мксек*. Тогда весь процесс повторится 1000 раз в секунду. Пусть мы проводим эксперимент в течение 10 *мин* (около 600 000 групп электронов) и фиксируем полное число отсчетов детектора (около 100 000). Затем мы увеличиваем время удержания электронов в ловушке до 100,5 *мксек* и проводим эксперимент опять в течение 10 *мин*. Потом мы переходим к 101 *мксек* и т. д.

Отложим затем число отсчетов в каждом 10-минутном интервале как функцию времени, в течение которого электроны удерживались в ловушке (рис. 6). Для того чтобы попасть с одного максимума на соседний с ним, надо увеличить время пребывания в ловушке примерно на 2,6 *мксек*. Это соответствует примерно времени 1000 дополнительных оборотов при движении электронов по винтовой линии. Чтобы определить различие во времени между двумя максимумами на кривой с наибольшей возможной точностью, в чем и состоит основной смысл эксперимента, мы используем данные о таком интервале времени, на котором умещается несколько

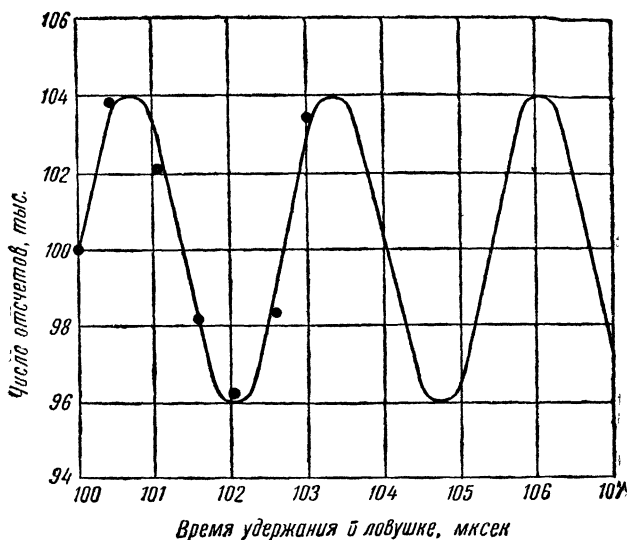


Рис. 6. Число отсчетов в каждом 10-минутном интервале как функция времени, в течение которого электроны удерживались в ловушке.

ко сотен максимумов и минимумов, а затем возьмем среднее значение.

Из таких измерений еще нельзя извлечь непосредственно значение g -фактора электрона. Вместо него мы получаем величину, которая называется «аномальностью» g -фактора и равна половине разности истинного g -фактора и его «нормального» значения, равного 2. Она обратно пропорциональна различию во времени между соседними максимумами на кривой, полученной из эксперимента. Так как эта «аномальность» примерно в 1000 раз меньше, чем сам g -фактор, то это означает, что наши измерения, можно сказать, имеют запас в точности около 1000. Например, если мы меряем «аномальность» с точностью до одной сотысячной доли, то мы получим g -фактор с точностью примерно до одной стомиллионной доли.

Первый эксперимент, в котором были использованы идеи, описанные мною выше, был поставлен Артуром А. Шаппом, следующим за Луиселом аспирантом.

Когда ему удалось решить все возникшие проблемы, он сумел получить ответ о g -факторе, точность которого составляла несколько десятимиллионных долей.

Как это случается во многих экспериментальных работах, к тому времени когда Шапп начинал проводить свои измерения, мы знали уже о множестве усовершенствований, которые можно было бы сделать. Так что, когда следующий

аспирант Давид Т. Уилкинсон принял эту эстафету, он начал с того, что разобрал те части аппаратуры, которые больше всего нуждались в улучшении. Но он не смог уже остановиться и перебрал всю установку. Полностью новая установка, которую он построил, не отличалась принципиально от старой, но она обладала многими характеристиками, которые существенно увеличивали ее надежность и точность.

Результат Уилкинсона оказался на два порядка точнее данных, полученных ранее. Он нашел, что g равняется $2,002319244 \pm 0,000000054$. Этот результат был и до сих пор остается наиболее точным измерением во всей физике вообще. Теоретический расчет дал для этой величины значение $2,002319230$. Таким образом с этой степенью точности теория нашла свое подтверждение. Однако ни мы, ни теоретики не хотим оставить эти результаты в покое. Мы испробуем другие средства. Наш новый аспирант Джон Уэсли успешно проектирует еще один эксперимент.

Перед тем как Уилкинсон оставил работу над этой темой, он вместе с другим аспирантом, Артуром Ричем, обратил внимание на возможность измерения g -фактора позитрона. Позитрон представляет собой электрон антивещества, противоположно заряженный двойник электрона. В нашем мире позитрон может существовать недолго, после чего он аннигилирует с электроном, превращаясь в световые кванты. Позитроны для эксперимента по измерению g -фактора получают из радиоактивного источника. Основная часть эксперимента — захват частиц в магнитной ловушке — по своей идее ничем не отличается от схемы, использованной в случае электронов. Однако поляризация и анализ ведутся уже по-другому.

Этот эксперимент исключительно сложен, так как число доступных для опыта позитронов очень мало. Тем не менее, Ричу удалось получить значение g -фактора позитрона с точностью до одной стотысячной доли. Оно согласуется с величиной, полученной для электрона. Джон Гиллеленд, другой аспирант, подготавливает сейчас опыт, с помощью которого он надеется улучшить эту точность.

Могут спросить, почему же так важно измерять g -фактор позитрона, если мы верим в то, что он является точным двойником электрона. Конечно, верно то, что мы и не ожидаем получить другой результат в случае позитрона, возможно, даже при наибольшей точности, которую мы когда-либо способны получить. Однако мы не должны принимать это на веру. Вопросы симметрии в природе, примером которых и является рассмотренный выше, оказались весьма коварными, и они еще не поняты полностью.

Имеется множество доказательств того, что не только электрон, но и все другие заряженные частицы должны об-

ладать противоположно заряженными двойниками. Огромное количество таких двойников уже получены и изучены. Поэтому можно наблюдать уже мир из антивещества, составленный полностью из таких античастиц.

В этом смысле электрон является обитателем нашего мира, а позитрон — чужак в этом мире. Как я упоминал ранее, аномальность g -фактора связана со взаимодействием электрона с тем миром, в котором он находится. При естественном обобщении этой мысли немедленно возникает недоуменный вопрос: следует ли ожидать, что g -факторы электрона и позитрона будут строго равны только в том случае, если каждый из них находится в своем собственном мире? Чтобы решить эту проблему, надо было бы поставить эксперименты с электронами в мире вещества, а эксперименты с позитронами — в мире антивещества. Но тогда где нам найти аспиранта из антивещества, который бы пошел в антимир и провел там все необходимые измерения?

Причинность и дисперсионные соотношения

(Диалог на темы классической физики).

Действующие лица: Изобретатель — И.
Физик — Ф.

И. Привет, старина! Перестань витать в небесах и опустишь на землю. Помнишь меня?

Ф. ...?

И. Ну, конечно, нет. Давным-давно мы вместе изучали физику, но после трех лет учебы это занятие показалось мне чересчур абстрактным, и я бросил его. Теперь я...

Ф. О, конечно, я помню. Рад снова увидеть тебя. Ты, кажется, преуспевашь. Чем ты занимаешься?

И. Я изобретаю различные штуки, и мои скромные познания в физике мне очень помогают. Это — увлечение (hobby), которое обеспечивает мне хорошую жизнь. Как раз недавно я изобрел поистине фантастическую вещь. Представь себе, я собираюсь сделать очки, которые позволяют видеть в темноте.

Ф. Каким образом?

И. Очень просто. Настолько просто, что я удивляюсь, как до сих пор никто до этого не додумался. Причина, по-видимому, состоит в том, что изобретатели недостаточно хорошо знают физику, а физики мало думают о практических приложениях. Их абстрактные размышления не приносят никакой пользы. Так или иначе идея состоит в следующем: предположим, что ты находишься в темной комнате, где имеется сигнальный источник света — что-то вроде того, что используется в ваших пультных камерах. Свет вспыхивает всегда, когда тыходишь в комнату, но тотчас же после этого гаснет и комната снова становится абсолютно темной. Однако если произвести Фурье-разложение этой вспышки света, то окажется, что в ней присутствуют все частоты, причем каждая из них представляет собой бесконечную синусоидальную волну. Амплитуды и фазы этих волн находятся в таком соотношении, что при суммировании все волны гасят друг друга за исключением малой доли секунды, равной продолжительности вспышки. Ты согласен?

Ф. Разумеется, продолжай дальше.

И. Итак, мое изобретение состоит в том, чтобы использовать очки из цветного стекла, которое пропускает только одну частоту — или очень узкую полосу частот — и поглощает все остальные. Прошедший сквозь очки свет описывается бесконечной синусоидальной волной. Поглощенная часть спектра теперь уже не сможет погасить прошедшую волну, поэтому на твои глаза будет падать свет и ты будешь видеть. Разве это не великолепно?

Ф. Пытался ли уже ты осуществить свой замысел?

И. Да, но пока что по каким-то причинам прибор не работает. Быть может, я еще не нашел подходящего стекла, или полоса частот, которые оно пропускает, еще слишком велика. Я испробую теперь фильтр с очень узкой полосой пропускания. Возможно, кроме того, что такая

узкая полоса будет обладать слишком малой энергией. Тогда придется придумать какой-то усилитель. Но это уже чисто технические детали.

Ф. Быть может, ты упустил из виду еще одну небольшую техническую деталь. У меня есть некоторые идеи на этот счет. Но сейчас я тороплюсь. Давай встретимся завтра в 8 часов вечера в кофейном баре. Хорошо?

И. Прекрасно. И обещаю тебе, я не опоздаю ни на секунду. Пока! Ф. Пока.

Вечер следующего дня, 8 час. 15 мин.

И. Привет! Виноват, что опоздал.

Ф. Ты обещал не опаздывать.

И. Я действительно очень сожалею. Я вышел из дома в 7 часов, хотя для того, чтобы добраться оттуда сюда, вряд ли нужно более двадцати минут. Мне не повезло, я упустил автобус. Правда, я еще мог успеть задолго до 8 часов со следующим автобусом. Но, как только я сел в него, отказал мотор. Ты знаешь, такие вещи случаются раз в 10 лет. Я решил идти пешком. Даже в этом случае я еще успел бы вовремя, если бы неизвестный мужчина не попытался ограбить ювелирный магазин. Он бросил камень в окно магазина как раз в тот момент, когда я проходил мимо. Несомненно, он сумасшедший. Представь себе, грабить ювелирный магазин ранним вечером на виду у всех людей. Конечно, его схватили. Но до чего же он был безумен. Он не произнес ни одного слова, хотя говорил все время. Так как я, к несчастью, видел, как все происходило, меня отвели в полицию и мне пришлось потратить уйму времени, описывая мельчайшие подробности. И вот, наконец, я здесь.

Ф. Но ты же обещал не опаздывать.

И. Я же тебе сказал, что пытался найти наилучший выход. Но расскажи лучше о той детали, которую, по твоему мнению, я упустил из виду.

Ф. Очень жаль, что ты опоздал.

И. Мне надоело твои упреки. Не мог же я все предвидеть. Смог бы ты предугадать всю ту цепь почти совершенно невероятных событий, которые послужили причиной моего опоздания. Я тебе ручаюсь, что никто не мог бы этого сделать.

Ф. Вот в этом как раз и состоит та маленькая деталь, которая губит твоё изобретение.

И. Как это так? Если ты хочешь подшутить надо мной, то я лучше уйду.

Ф. Не торопись. Ты начал с разложения световой вспышки в ряд Фурье. С помощью анализа Фурье можно исследовать любую величину, которая изменяется во времени. Можешь ли ты придумать какой-либо другой пример?

И. Это хорошая идея. Посмотрим, может быть мое изобретение можно применить еще для чего-нибудь. Ну, конечно, для звука.

Ф. Я думал об этом. Что произойдет, если к стреляющему ружью поднести камертон?

И. Согласно моим аргументам он должен вибрировать, так как он выбирает из шума одну Фурье-компоненту. Принцип остается тем же, что и в случае моего цветного стекла.

Ф. Конечно. И ты уже наблюдал когда-либо нечто подобное?

И. Конечно. Наблюдал. Я очень хорошо помню мои эксперименты с кислородом. Камертон, который оказался в моей лаборатории, звучал еще в течение 20 секунд после экспериментального взрыва.

Ф. И я уверен, что тебе известны вещества, которые светятся после того, как они находились на свету.

И. Зачем ты задаешь мне такие вопросы? Каждый знает об этом по своим ручным часам. И твои примеры только лишний раз доказывают, что мое изобретение должно работать. Однако я начинаю сомневаться в том, что его возможно будет применить на практике. Дело в том, что излучение фосфоресцирующих веществ, камертонов и тому подобное за-

тухает в течение сравнительно небольшого времени. Ты имеешь в виду именно эту деталь?

Ф. Не совсем. Скажи мне, звучал ли твой камертон до экспериментального взрыва?

И. Нет, разумеется нет! Поскольку... О, я сказал «разумеется»? Конечно, я не думал, что это «разумеется». Просто твой вопрос застал меня врасплох. В действительности я думаю, что...

Ф. ?

И. Подожди... Действительно, я никогда не наблюдал такого явления. С одной стороны, это кажется вполне естественным: по этой причине у меня вырвалось «разумеется». Но это противоречит моему аргументу относительно Фурье-разложения и выделения определенной частоты и поэтому кажется, что это не «разумеется». Тут имеется противоречие, которое я действительно не могу понять. И ты не только застал меня врасплох. Ты действительно думаешь, что здесь кроется основная причина.

Ф. Возьми твой камертон. Что, если бы он начал звучать до взрыва?

И. Я думаю, куда ты клонишь. Имея время затухания порядка 20 сек, он должен был бы зазвучать за 20 сек до взрыва. Но как он может точно «знать», какой окажется полоса частот?

Ф. Если даже ты не смог предвидеть, что опоздаешь сегодня вечером! Теперь ты видишь упущенную деталь?

И. Да, я начинаю понимать. Ты хочешь сказать, что мое изобретение — по крайней мере, мой аргумент — противоречит причинности? Ты говоришь, что если бы такой прибор действительно работал, то услышав, что камертон зазвучал, я мог бы с уверенностью предсказать, что в следующую минуту произойдет взрыв — вопреки тому, что возможна неисправность зажигания?

Ф. Это правильный ответ, и ты нашел его сам.

И. Я должен признаться, что этот общий аргумент не очень много мне проясняет, хотя я должен с ним согласиться. Он имеет для меня почти такую же убедительную силу, какую закон сохранения энергии или второй закон термодинамики имеет для человека, который только что изобрел вечный двигатель. Слышал ли ты когда-нибудь, чтобы такой человек сказал: «Благодарю Вас за то, что Вы напомнили мне об основных законах физики. Теперь я ясно вижу, что мое изобретение неправильно». Ни один изобретатель вечного двигателя не скажет этого, пока ты не укажешь на специфический недостаток его машины. Я не настолько глуп, чтобы воевать против принципа причинности до тех пор, пока нет серьезных оснований усомниться в нем, однако этот аргумент все же меня не удовлетворяет. Я должен понять, в каком именно пункте ошибочно мое рассуждение. Разве ты не согласен с тем, что каждая Фурье-компонента представляет собой бесконечное по времени колебание и что существуют механизмы (например, фильтры), которые позволяют выделить из всей полосы одну (или несколько) частот? Где же тогда ошибка?

Ф. Давай поищем. Попытаемся найти, по возможности, наиболее общий метод описания физических явлений (чтобы у тебя, мой друг, не было соблазна придумать завтра еще один способ обмана причинности). У тебя есть система, называемая черным ящиком. Под этим можно, в частности, понимать все приборы, о которых шла речь выше (цветное стекло, камертон и т. д.). Имеется некоторая сила, называемая «воздействием», которая действует на ящик, и реакция ящика на это воздействие. Как воздействие, так и реакция является функцией времени. Теперь, будь добр, опиши, пожалуйста, свойства этого ящика — я имею в виду такие ящики, которые могут быть названы причинными.

И. Хорошо. Прежде всего, я думаю, что этот ящик должен связывать воздействие и реакцию линейным образом. Я знаю нелинейные системы, которые могут самовозбуждаться.

Ф. Хорошо, может оказаться, что это ограничение является даже слишком сильным, так как нам известны и такие нелинейные системы, ко-

которые не способны самовозбуждаться и являются причинными. Но для простоты будем предполагать, что связь линейна. Что еще?

И. Твой черный ящик не должен обладать внутренними степенями свободы. Если он обладает внутренними свойствами, которые могут изменяться с течением времени, то он может излучать без какого-либо воздействия. Это излучение означает, что произошло какое-то изменение внутреннего состояния самого ящика.

Ф. Это все? Пока что ты исключил только возможность влияния ящика на самого себя. Что же ты можешь сказать в этом случае о причинной связи между данным воздействием и соответствующей реакцией? Представь себе камертон.

И. Если представить себе хлопок или вспышку — я имею в виду любое воздействие, имеющее форму $f(t) = \delta(t-t_0)$, то, согласно твоим аргументам, основанным на принципе причинности, нужно потребовать, чтобы реакция $g(t)$ при $t < t_0$ отсутствовала, но могла продолжаться в течение некоторого времени после t_0 .

Ф. Очень хорошо. Теперь сформулируем это математически. Поскольку реакция является линейной функцией — воздействия, то соотношение между ними может быть записано в форме

$$q(t) = \int_{-\infty}^{\infty} L(t, t') f(t') dt'. \quad (1)$$

Ты согласен?

И. Полностью. Я могу сказать даже больше. Если функция $L(t, t')$ описывает связь между воздействием и реакцией черного ящика и если свойства черного ящика не изменяются со временем, то функция $L(t, t')$ может зависеть только от разности $t-t'$.

Ф. А к чему приводит твоё последнее требование?

И. Если $f(t) = \delta(t-t_0)$, то мы получим:

$$q(t) = \int_{-\infty}^{\infty} L(t-t') \delta(t'-t_0) dt' = L(t-t_0), \quad (2)$$

а так как $g(t) = 0$ при $t < t_0$, то, следовательно, и $L(t-t_0) \equiv 0$ при $t < t_0$. Я, однако, не вижу, какое все это имеет отношение к моей проблеме. Ведь я начал с рассмотрения того, какова реакция черного ящика на каждую компоненту разложения Фурье.

Ф. Так почему же ты не применишь преобразование Фурье к уравнению

$$q(t) = \int_{-\infty}^{\infty} L(t-t') f(t') dt' \quad (3)$$

и не посмотришь, что получится?

И. Хорошая идея. Обозначив фурье-трансформанту,

$$\tilde{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{i\omega t} dt$$

получим

$$\tilde{q}(\omega) = \tilde{L}(\omega) \tilde{f}(\omega).$$

Это очень приятно. Монохроматическое воздействие просто умножается на число. Если ящик действует как фильтр, то $\tilde{L}(\omega) = 0$, за исключением той полосы частот, которую он пропускает. Я все еще не вижу, что же ошибочно в моем изобретении. Напротив, похоже на то, что эта формула только подтверждает мою аргументацию.

Ф. Ты еще не полностью использовал принцип причинности: я имею в виду соотношение $L(t-t') \equiv 0$ при $t-t' < 0$. Ты будешь удивлен тем, что скажет тебе об $\tilde{L}(\omega)$ это соотношение.

И. Посмотрим. Я пишу

$$\tilde{L}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} L(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau; \quad L(\tau) = 0 \text{ при } \tau < 0.$$

Да, я вижу: $\tilde{L}(\omega)$ является аналитической функцией ω , которая голоморфна в верхней полуплоскости, так как вклад в интеграл дают только положительные τ . Ты думаешь, что это серьезно сужает класс допустимых функций $\tilde{L}(\omega)$?

Ф. Да. Позволь мне теперь использовать небольшую хитрость для того, чтобы получить более детальное описание соответствующих ограничений. Я лучше скажу: другое описание, так как оно полностью эквивалентно тому, что функция голоморфна в верхней полуплоскости. Насколько я тебя знаю, ты не будешь настаивать на строгом обосновании математических тонкостей. Это позволяет дать значительно более короткое объяснение сути дела. Коль скоро $\tilde{L}(\omega)$ является голоморфной функцией в верхней полуплоскости, она может быть представлена при $\text{Im}\omega > 0$ с помощью формулы Коши следующим образом:

$$\tilde{L}(\omega) = \frac{1}{2\pi i} \int_C \frac{\tilde{L}(\omega') d\omega'}{\omega' - \omega} + \frac{1}{2\pi i} \int_{C'} \frac{\tilde{L}(\omega') d\omega'}{\omega' - \omega}, \quad (4)$$

причем контур интегрирования показан на рис. 1. Второй интеграл вклада не дает. Моя хитрость состоит в том, что я все же его добавлю. Устремим теперь радиусы полуокружностей к бесконечности и предположим, что функция $\tilde{L}(\omega)$ убывает достаточно быстро для того, чтобы вклады от интегрирования упомянутым полуокружностям в этом пределе исчезали (если это условие не выполняется, то мы рассмотрим вместо $\tilde{L}(\omega)$ функцию $\tilde{L}(\omega)$, деленную на полином соответствующей степени). Теперь

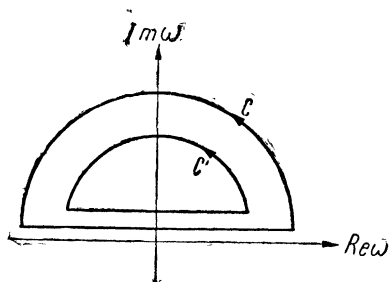


Рис. 1.

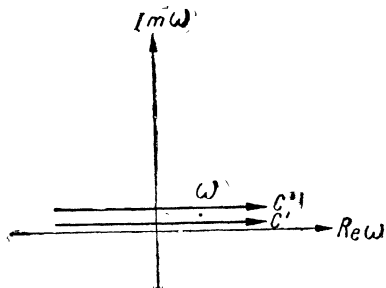


Рис. 2.

контур интегрирования выйдет так, как показано на рис. 2, причем прямые C и C' простираются в обе стороны неограниченно. Наконец, устремим прямые C и C' к вещественной оси, продолжая держать ω между ними. В результате получим...

И. ...удвоенное главное значение интеграла, не так ли?

Ф. Верно, у тебя хорошая память; мы получим (буквой P обозначено главное значение):

$$\tilde{L}(\omega) = \frac{1}{2\pi i} 2P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\tilde{L}(\omega') d\omega'}{\omega' - \omega}, \quad (\omega \text{ — вещественно}).$$

Конечно, это не доказательство, но, однако, наши эвристические аргументы привели к правильной формуле. Напишем теперь уравнение для вещественной и мнимой части функции по отдельности:

$$\tilde{L}(\omega) = \operatorname{Re} \tilde{L}(\omega) + i \operatorname{Im} \tilde{L}(\omega),$$

так что

$$\operatorname{Re} \tilde{L}(\omega) = \frac{P}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\operatorname{Im} L(\omega') d\omega'}{\omega' - \omega}, \quad (5)$$

$$\operatorname{Im} \tilde{L}(\omega) = - \frac{P}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\operatorname{Re} \tilde{L}(\omega') d\omega'}{\omega' - \omega}.$$

Эти две формулы, называемые дисперсионными соотношениями, полностью эквивалентны условию $L(\tau) \equiv 0$ при $\tau < 0$ и, следовательно, принципу причинности. Конечно, на пути доказательства этой эквивалентности возникают тонкие математические вопросы, которые мы не обсуждали. Их изложение содержится в точной формулировке и доказательстве теоремы Титчмарша, которая состоит в том, что (выражаясь не строго) три свой-

ства функции $\tilde{L}(\omega)$:

а) подчиняться дисперсионным соотношениям,
б) являться Фурье-трансформатой функции $L(\tau)$, которая обращается в нуль при $\tau < 0$,

γ) быть голоморфной в верхней полуплоскости — являются, по существу, одним свойством, сформулированным различным образом.

И. Я начинаю понимать, как «работает» принцип причинности. Но все же я хотел бы убедиться на конкретных примерах оптического фильтра и камертона. Я хорошо помню, что в классической электродинамике получается хорошее описание оптических свойств прозрачных сред, если использовать соотношение между показателем преломления и поляризуемостью, а последнюю рассчитать на основе модели, в которой электроны считаются гармоническими осцилляторами, колеблющимися под воздействием электрического поля падающей световой волны. И камертон в конечном счете тоже представляет собой нечто вроде линейного осциллятора. Не можем ли мы попытаться рассмотреть вполне конкретный черный ящик, именно, линейный осциллятор с затуханием, и непосредственно к этому случаю применить развитые выше соображения? Что касается меня, то я буду не в состоянии уснуть до тех пор, пока не разберусь в этом конкретном примере.

Ф. Очень хорошо. Напишем

$$\ddot{x} + qx + \omega_0^2 x = f(t) \quad (6)$$

и будем рассматривать $f(t)$ как воздействие, а $x(t)$ — как реакцию на это воздействие. Применим к этому уравнению преобразование Фурье. В результате несложных вычислений получим

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} L(t-t') f(t') dt' = \frac{1}{\omega_0^2} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\gamma(t-t')} \sin[\omega_0'(t-t')] f(t') dt',$$

Ясно, видно, что полученное выражение является причинным.

Ф. Для того чтобы довести свои рассуждения до конца, ты должен еще рассмотреть хлопок или вспышку: я имею в виду $f(t') = \delta(t')$.

И. Хорошо, согласно тому, что было получено выше

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} L(t-t')\delta(t')dt' = L(t),$$

причем $L(t) \equiv 0$, если $t < 0$. Скажи, разве это не то же самое, что обычно называют функцией Грина для дифференциального уравнения? Это же решение уравнения, в котором неоднородный член представляет собой δ -функцию.

Ф. Совершенно верно. Теперь обсудим то, что мы получили.

И. Если обозначить точное выражение для функции Грина через $x_0(t)$, то мы имеем:

$$x_0(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ \frac{1}{\omega'_0} e^{-\frac{1}{2}\gamma t} \sin \omega'_0 t & \text{при } t \geq 0. \end{cases} \quad (7)$$

Колебания возникают с момента $t=0$, имеют частоту ω'_0 и затухают с декрементом $\frac{1}{2}\gamma$. Частота и декремент затухания являются (с точностью до знака) соответственно вещественной и мнимой частями полюсов функции $\tilde{L}(\omega)$. Начальная амплитуда колебаний, равная $1/\omega'_0$, представляет собой сумму модулей вычетов функции $\tilde{L}(\omega)$ в этих полюсах (см. (8) и (9)).

Ф. Подытожим, что же мы получили в результате. Причинная система может хорошо пропускать определенную часть спектра и (почти полностью) поглощать всю оставшуюся часть, но вещественная и мнимая части функции $\tilde{L}(\omega)$ всегда связаны так, что независимо от того, какова поглощенная часть спектра, остаток имеет как раз такие сдвиги фаз, что реакция никогда не предшествует воздействию. Соответствующее соотношение между вещественной и мнимой частями выражается с помощью дисперсионных соотношений. Реакция, однако, может запаздывать, а не возникать и исчезать одновременно с воздействием. Насколько запаздывает реакция, какова ее амплитуда и время жизни зависит от положения особенностей функции $\tilde{L}(\omega)$ в нижней полуплоскости и величины соответствующих вычетов. С подобной ситуацией ты встретишься во всех случаях, когда учитывается влияние принципа причинности, например, в квантовой теории рассеяния, где функция $\tilde{L}(\omega)$ оказывается значительно более сложной.

Там ее называют амплитудой рассеяния: она имеет не только полюса, но также и разрезы. Разрезы связаны с рождением новых частиц в процессах взаимодействия, а полюса имеют смысл очень близкий к тому, который они имели в разобранном нами простом примере: их реальные и мнимые части представляют собой соответственно частоты (энергии) и обратные времена жизни резонансов.

И. Большое тебе спасибо. Теперь я понял, что причинность является не только принципиальным аргументом против моего злополучного изобретения. Я понял даже, каким образом материальная физическая система примиряет принцип причинности с существованием частотных фильтров. Разумеется, теперь я уже не буду предпринимать попыток дать более подходящее стекло. До свидания.

Ф. До свидания.