

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.124

g*-ФАКТОР ЭЛЕКТРОНА *)**Г. Крейн***

Когда мы в 1950 г. начинали ставить свои эксперименты для определения *g*-фактора электрона, то, конечно, не могли даже представить, что семнадцатью годами позже мы все еще будем продолжать эти эксперименты. Однако сейчас уже шестой аспирант начинает свою работу над этой темой. Работа продвигалась без видимой спешки и затянулась надолго. Создается впечатление, что нашей группе позволили «оккупировать» небольшой уголок физики. Такая привилегия предоставляется обычно тем, кто работает над темами, которые считаются или чересчур тяжелыми и утомительными, или же имеющими настолько малое значение, что никто не стремится вызвать вас на соревнование. Когда мы задумываемся над тем, что результаты более чем пятидесяти «человеко-лет» нашего труда с затратой около полумиллиона долларов можно, по-видимому, записать на полях обычной почтовой марки, то кажется неудивительным, что большинство физиков рады увидеть, что такая работа проделана не ими, а кем-то другим. С точки зрения исторического описания этой работы интересно отметить те обстоятельства, которые вынудили нас начать ее, те изменения, которые приходилось делать в некоторых устройствах по мере продвижения к цели, и то, что все это удалось осуществить совсем не так, как мы планировали вначале, а намного лучше.

В этой статье я упомяну о всех запомнившихся мне трудностях и ошибках, которые преграждали нам путь. Конечно, я мог бы написать так, чтобы казалось, что все время мы четко знали, что мы хотим делать. Однако я приберегу подобное красноречие для написания запросов на финансирование нашей работы или же для статей в специализированных физических журналах. Мне кажется, что наука намного интереснее того, что обычно излагается. Именно эту сторону наших переживаний я и хочу показать здесь.

g-фактор — это величина, которой можно охарактеризовать любой вращающийся объект с магнитным моментом, направленным параллельно оси вращения. (Величина магнитного момента, скажем, куска намагниченного железа или же стрелки компаса обычно просто определяет,

*) Н. R. Crane, The *g* Factor of the Electron, Scientific American 218 (4), 72 (1968). Перевод и примечания И. И. Ройзена.

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

насколько силен этот магнит. Магнитный момент направлен вдоль линии, соединяющей противоположные полюсы магнита. Например, Земля почти попадает в категорию таких объектов. Она принадлежала бы к этой категории, если бы ее северный и южный магнитные полюсы не были чуть-чуть смещены относительно ее Северного и Южного географических полюсов.)

Если вращающийся объект, обладающий такими свойствами, поместить во внешнее магнитное поле (поле, отличное от того, которое обусловлено собственным магнитным моментом этого объекта), 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 колесу.)

Если внешнее магнитное поле находится в распоряжении экспериментатора и может быть выбрано, в принципе, сколь угодно сильным, то отношение, о котором я только что упомянул выше (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 отношение будет, вообще говоря, другой, но тоже строго заданной величиной. Поскольку при интерпретации весьма многочисленных явлений достаточно знать только это отношение для разных частиц (а не угловой и магнитный моменты по отдельности), измерения его с высокой степенью точности стали предметом интенсивных исследований. Это отношение называется g -фактором частицы.

Пока я только лишь сказал, почему g -факторы частиц представляли 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 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 проводочному 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 г., 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 роль Уленбека состояла в том, что тот 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. Нетрудно понять это 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 магнетоном Бора, равна $e\hbar/2mc$, где e и m обозначают соответственно заряд и массу электрона, а c — 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» ($e\hbar/2mc$) 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, 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 верны, 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

*) См. перевод статьи Гаудсмита в УФН 93 (1), 151 (1967).

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 отсутствия 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, 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 Лэмбу и Поликарпу Кашу в 1955 г. (за экспериментальные исследования) *) и Юлиану Швингеру, Ричарду Фейнману и Син-Итиро Томонаге в 1965 г. (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. Использование 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 г.), 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,

*) См. перевод статьи П. Каша в УФН 93 (1), 159 (1967).

**) См. перевод Нобелевских лекций Р. Фейнмана, Ю. Швингера и С. Томонаги в УФН 91 (1), 29, 49, 61 (1968).

оказался хорошо применимым к данным конкретным приложениям, все еще остается под вопросом с точки зрения его общности.

Таково было состояние дел в 1950 г., когда мы приступили к измерениям g -фактора. Вокруг этого вопроса было заметно некое 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 громкий зов, то вся последовательность событий выглядела бы так, как она должна была бы выглядеть. Но мы подошли к этому совсем не таким простым путем. Мы подошли как бы пятясь назад. Я опишу подробнее, как все это происходило.

В 1946 г. мы занялись проектированием и постройкой одного из крупнейших электронных ускорителей того времени. По мере работы возник ряд задач, которые следовало решить. Тогда над проектом работали аспиранты, которые, естественно, должны были решать диссертационные проблемы и защищать свои диссертации, не дожидаясь, когда синхротрон начнет работать. Одним из таких аспирантов был Уиллис Х. Луисел, который ныне работает в Южнокалифорнийском университете. Роберт В. Пидд (ныне работает в «Галф дженерал атомик корпорейшн»), один из нескольких профессоров, имевших отношение к проекту ускорителя, был председателем аспирантской комиссии, а я был членом этой комиссии. Мы решили попытаться поставить диссертационную задачу таким образом, чтобы для ее решения не был нужен 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 Мэв. 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 запросы 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 поворачивать 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 элек-

троны, спины которых направлены в одну сторону, и отбросить все остальные. И мы знаем, как провести такую сортировку. Весьма 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»,

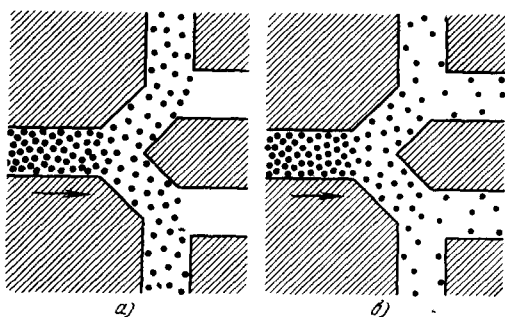


Рис. 1. Использование двойного рассеяния является основой наших экспериментов по измерению g -фактора.

а) Мотоциклисты с карточками; б) мотоциклисты без карточек.

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).

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 выше 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 непосредственно 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. Моттом в 1929 г. *). Поэтому этот процесс рассеяния назван его именем. Сейчас

*) См., например: Н. Мотт, Х. Мессси, Теория атомных столкновений, Л.— М., ГТТИ, 1933, стр. 72.

нам кажется очень удивительным тот факт, что понадобилось около шести лет для того, чтобы предсказанный теоретически эффект удалось наблюдать в эксперименте. Даже к 1950 г., 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,

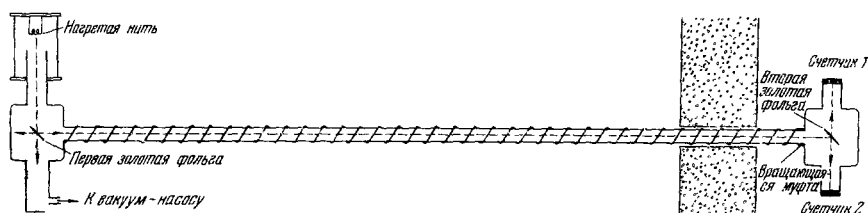


Рис. 2. Оригинальная аппаратура, построенная автором и его коллегами в Мичиганском университете, была предназначена для изучения поляризации (или степени параллельного выстраивания) осей спинов электронов в пучке электронов высокой энергии с помощью двойного рассеяния.

чтобы электроны рассеивались во второй раз на некотором удалении от инжектора, а именно в следующем зале, расположенном от инжектора на расстоянии около 30 футов *). 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 электроны, 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, направления их спинов могут уже отличаться от тех, которые были бы в отсутствие магнитного поля. Нам было ясно, что в случае, если такая прецессия действительно имеет место и если мы можем зарегистрировать изменение направления спина, то мы сможем определить

*) 1 фут = 30,48 см.

величину магнитного момента, которая заинтересует физиков намного больше, нежели те результаты, которые мы надеялись получить 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 достаточных 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, равному 2, т. е. точно совпадающему с g -фактором электрона, вытекающим из уравнения Дирака. Возьмите любой твердый цилиндр правильной

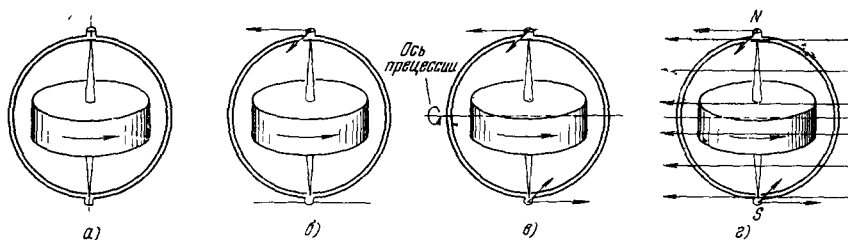


Рис. 3. Модель вращающегося электрона.

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 петлю 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 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 полюсы 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 Луиселоа ось вращения совершала 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 г. 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 неосуществимы 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 стороне 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, мы столкнулись именно с этим старым убеждением, что ни одному эксперименту в этой области не может сопутствовать удача.

Я могу рассказать об одном инциденте, который кажется удивительным с ретроспективной точки зрения, чтобы показать, насколько твердым было убеждение в том, что эксперименты по измерению магнитного момента не удастся провести. На собрании Американского физического общества в Вашингтоне в апреле 1953 г. Луисел доложил результаты своего первого успешного опыта. Двое теоретиков из нашего отдела, Кеннет Кейс и Гарольд Мендловитц, представили доказательство того, что основные концепции эксперимента находятся в полной гармонии с квантовой механикой. Однако это доказательство показалось еще неубедительным некоторым присутствовавшим физикам, и они начали цитировать нам доказательства Бора. Физик, возражавший наиболее активно, сказал позже, что, когда он летел обратно в самолете и был уже на полпути к дому, он понял, что нет никакого противоречия между нашим экспериментом и тем, что было показано Бором!

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

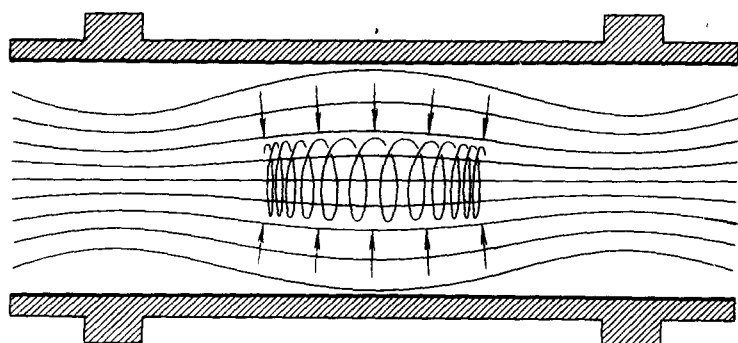


Рис. 4. Магнитная ловушка с пробками.

«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 в том направлении, 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 (рис. 5). 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

*) В русской научной литературе обычно принят термин «магнитная ловушка с пробками».

необходимо для того, чтобы электроны попали в «магнитную бутылку» и двигались там по винтовой линии (рис. 5, 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

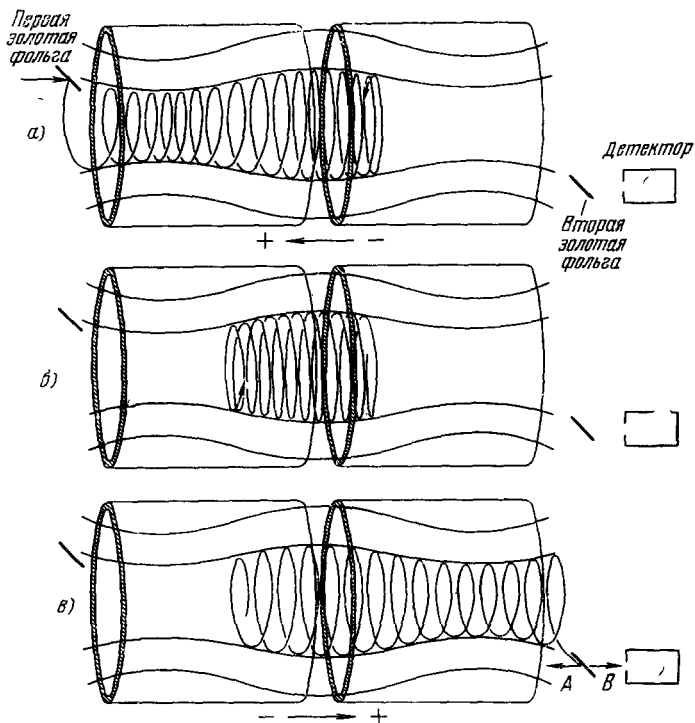


Рис. 5. Магнитная ловушка используется в эксперименте по измерению g -фактора электрона.

оси «бутылки», которое прикладывается, как только электронный пучок в первый раз проходит через центр «бутылки». Так как скорость электронов уменьшается, 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. 5, б).

Подержав электроны в «заточении» так долго, как это нам необходимо, мы снова прикладываем электрическое поле, но на этот раз уже в таком направлении, чтобы они ускорились 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. 5, в). При этом число электронов,

которые рассеиваются¹ в нужном¹ направлении, снова составляет очень малую долю 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

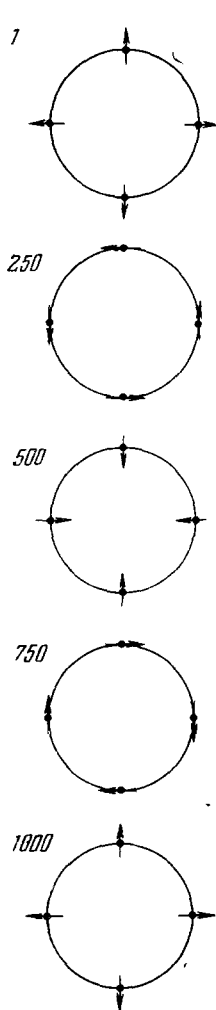


Рис. 6. Направление спинов (указано стрелками) при движении электрона по винтовой линии (указано кругами). Цифры означают число витков, пройденных электроном.

весьма неэффективным, и так это и есть на самом деле, то весь цикл, который я только что описал, повторяется примерно 1000 раз в секунду. Поэтому скорость счета равна примерно нескольким 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 в 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, спин 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. 6). 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, стрелка, указывающая направление спина, поворачивается за время первого оборота на орбите так, как будто она нарисована на ободе вращающегося колеса. Однако через несколько сотен 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, 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.

Очевидно, 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 изготовлен из золотой фольги). Вероятность электрону рассеяться вдоль заданного направления зависит от ориентации его спина. В 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 т. д. (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 положения 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 зависимости от 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. 7). 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 с наибольшей возможной точностью различие во времени между двумя максимумами на кривой, в чем и состоит основной смысл эксперимента, мы используем данные о таком интервале времени, на котором умещается несколько 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, это означает, что наши измерения,

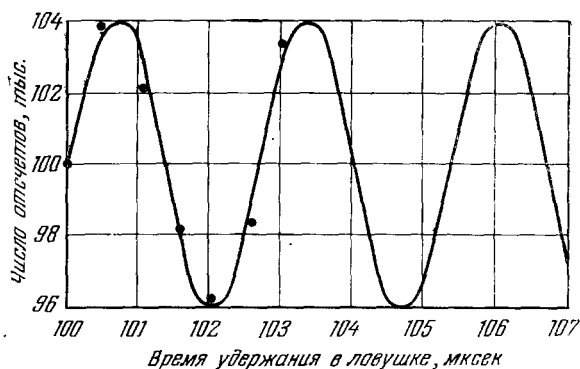


Рис. 7. Число отсчетов в каждом 10-минутном интервале как функция времени, в течение которого электроны удерживались в ловушке.

можно сказать, имеют запас в точности около 1000. Например, если мы измеряем «аномальность» с точностью до одной стотысячной 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 он начинал свою работу, нас переместили из основного зала на верхний этаж здания (так как к тому времени электронная пушка уже была нужна для работы синхротрона). Мы построили новую аппаратуру. При этом пришлось проделать огромную работу, так как это была первая попытка применения нового метода с использованием магнитной ловушки. Шапп оказался невероятно настойчивым. Когда ему удалось решить все возникшие проблемы, он сумел получить ответ о g -факторе, точность которого составляла несколько десятиллионных долей.

Как это случается во многих экспериментальных работах, к тому времени, когда Шапп начинал проводить свои измерения (вскоре после защиты диссертации он перешел на работу в «Дженерал Дайнемикс Корпорейшн»), мы знали уже о множестве усовершенствований, которые можно было бы сделать. Поэтому, 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

$$g = 2,002319244 \pm 0,000000054.$$

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 и перешел в Принстонский университет, он вместе с другим аспирантом, Артуром Ричем (работающим сейчас в Мичиганском университете), 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 обладать противоположно заряженными двойниками. Огромное количество таких двойников уже получено и изучено. 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 с 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?

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Rich, H. R. Crane, Phys. Rev. Lett. **17** (5), 271 (1966).
 2. E. M. Purcell et al., Phys. Rev. **B91** (2), 475 (1963).
 3. W. H. Louisell, R. W. Pidd, H. R. Crane, Phys. Rev. **94** (1), 7 (1954).
 4. A. A. Schupp, R. W. Pidd, H. R. Crane, Phys. Rev. **B121** (1), 1 (1961).
 5. D. T. Wilkinson, H. R. Crane, Phys. Rev. **130** (3), 852 (1963).
-