

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.124

## ИЗОЛИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОН \*)

Ф. Экстром, Д. Вайнлэнд

*С помощью одиночного электрона, связанного в искусственном атоме макроскопического размера, с непревзойденной точностью можно измерять электронный  $g$ -фактор.*

Электрон — удивительно простая частица материи. Он имеет массу и электрический заряд; он вращается (или кажется вращающимся) с постоянной величиной момента количества движения, и он обладает магнитным моментом, так что во внешнем магнитном поле на него действует поворачивающая сила. Этими четырьмя величинами исчерпываются все известные свойства электрона; после того как их значения установлены, ничего большего сказать об электроне нельзя.

Можно утверждать, что электрон даже проще, чем это можно себе представить при таком перечислении его свойств. Дело в том, что указанные четыре величины не являются независимыми; любая из них может быть получена из трех других. Например, магнитный момент электрона связан с его массой, зарядом и спином множителем пропорциональности, называемым  $g$ -фактором. С помощью современной теории электрона величину  $g$ -фактора можно вычислить с высокой точностью, его также можно определить экспериментально. Поэтому такие измерения являются чувствительным критерием правильности теории. Как вычисления, так и измерения  $g$ -фактора достаточно трудны, но они до такой степени усовершенствованы, что в настоящее время  $g$ -фактор электрона известен с большей точностью, чем любая другая физическая константа. Значения, полученные из теории и из эксперимента, соответствуют друг другу вплоть до последнего известного десятичного разряда.

Ряд экспериментов, которые выполнялись в течение нескольких лет в Вашингтонском университете, недавно достиг своей кульминации в новом измерении  $g$ -фактора, которым установлен новый рекорд точности. В этих экспериментах применялся новейший метод, при котором одиночный электрон в течение недель содержится запертым в «ловушке», образованной электрическим и магнитным полями (рис. 1). Фактически электрон и содержащий его аппарат образуют «атом» макроскопических размеров с чрезвычайно массивным ядром. Поскольку этот аппарат в конечном счете покоится на Земле, ядро можно даже отождествить с самой Землей,

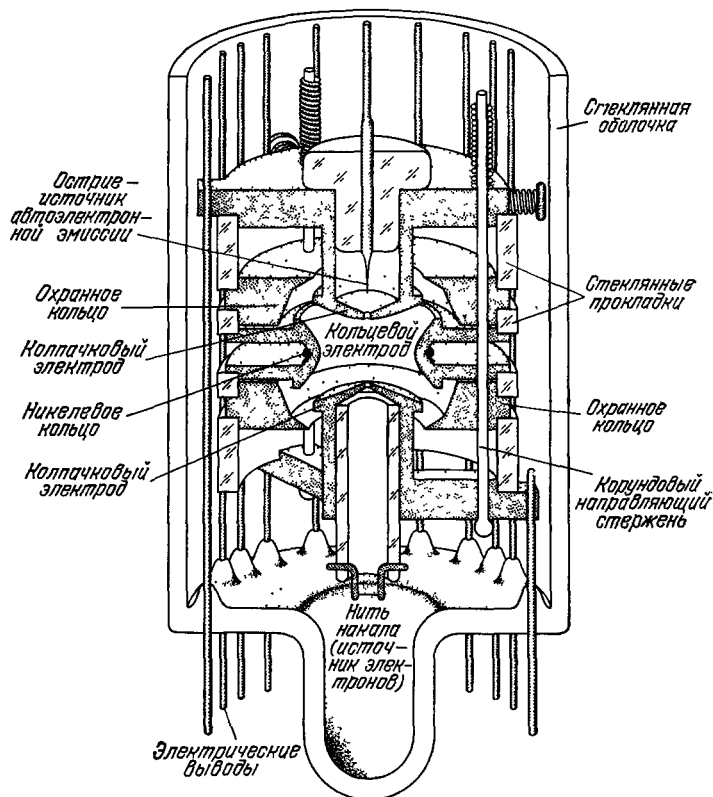
\*) Ekstrom Ph., Wineland D. The Isolated Electron.— Scientific American, August 1980, v. 243, No. 2, pp. 90—98, 100—101.— Перевод А. И. Ритуса.

Ф. Экстром — сотрудник обсерватории лабораторий «Бэтл-Норсвест» в Ричленде, Вашингтон; Д. Вайнлэнд работает в Национальном Бюро стандартов в Боулдере, Колорадо, США.

© Scientific American, Inc., 1980.

© Перевод на русский язык, издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, «Успехи физических наук», 1981.

и поэтому такому искусственному атому было дано название геониум. Движение одиночного электрона в геониуме отличается от движения электрона в обычном атоме, и оно более доступно управлению и измерению.



**Рис. 1.** Ловушка для электрона захватывает эту частицу в специальную конфигурацию электрического и магнитного полей.

Электрон находится в центральной полости, образованной двумя щипчатыми электродами и кольцевым электродом, эти электроды имеют математически заданную форму — они являются гиперболами. Два дополнительных электрода, охранные кольца, компенсируют несовершенства электрического поля. Весь аппарат, который имеет диаметр около полутора дюймов, погружен в жидкий гелий и введен внутрь сверхпроводящего магнита. Электрон в ловушке связывается комбинацией статических электрического и магнитного полей точно так же, как электрон в атоме связывается ядром. Здесь роль ядра играет аппарат, или даже Земля, на которой аппарат покоится, и поэтому такой атом получил название геониум.

По этим причинам оказалось возможным измерить  $g$ -фактор с ошибкой, меньшей, чем одна десятиллиардная.

□

Когда в 1897 г. Дж. Дж. Томпсон открыл электрон, сразу стало ясно, что эта частица имеет массу и заряд; действительно, Томпсон сделал свое открытие, измеряя отношение массы к заряду. Кроме того, предполагалось, по крайней мере неявно, что электрон обладает известными механическими свойствами, характерными для всех объемных предметов такими, как определенный размер и форма. Магнитный момент и собственный спиновый момент количества движения были добавлены к перечню свойств электрона ряд лет спустя, во время развития квантовой теории, в соответствии с гипотезой Самуэля А. Гаудсмита и Георга Е. Уленбека. Спин и магнитный момент потребовались, чтобы объяснить некоторые

особенности, наблюдаемые в спектре света, испускаемого или поглощаемого атомами.

На основании этих свойств может показаться, что электрон удастся описать простой механической моделью. Можно было бы представить себе электрон как материальную частицу с определенными размером и формой и с отрицательным электрическим зарядом, распределенным по ее поверхности. Эта частица должна была бы вращаться вокруг оси, почти так же, как вращается Земля, с определенной и неизменной величиной момента количества движения.

В этой модели наличие магнитного момента имеет простое объяснение. Вращение тела с зарядом на его поверхности неизбежно влечет за собой циркуляцию электрического заряда, или, другими словами, электрический ток. Циркулирующий ток приводит к наличию у электрона магнитного поля, точно так же, как это происходит в обмотках электромагнита. Как

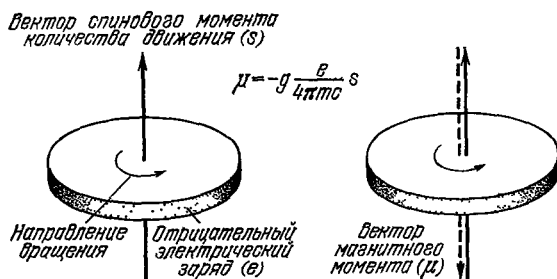


Рис. 2. Свойства электрона — это электрический заряд ( $e$ ), масса ( $m$ ), спиновый момент количества движения ( $s$ ) и магнитный момент ( $\mu$ ).

В простой механической модели электрон представляется вращающимся диском с зарядом, распределенным по его периметру. Ток циркулирующего заряда создает магнитный момент, и, следовательно, величину этого момента можно получить из остальных трех свойств. Соотношение определяется уравнением, в котором появляется константа пропорциональности, называемая  $g$ -фактором. Знак минус в уравнении означает, что магнитный момент антипараллелен вектору спина. Современная теория не допускает такого наглядного представления, но соотношение между магнитным моментом и спином остается справедливым и  $g$  можно вычислить с высокой точностью. В экспериментах с гео-ниумом  $g$  измеряется с такой же точностью.

спиновый момент количества движения, так и магнитный момент можно представить векторами, или стрелками, параллельными оси вращения. Векторы, представляющие спин и магнитный момент, принято направлять противоположно друг другу (поскольку заряд электрона — отрицательный) (рис. 2).

Продолжая рассуждения в рамках этой механической модели, можно ожидать, что магнитный момент пропорционален электрическому току, циркулирующему на периметре вращающегося электрона. Этот ток должен быть прямо пропорционален суммарному электрическому заряду и скорости вращения. В свою очередь, скорость вращения должна быть прямо пропорциональна спиновому моменту количества движения и обратно пропорциональна массе электрона. Связь между этими величинами (при выборе числовых коэффициентов в соответствии с определенной системой единиц) кратко можно выразить уравнением

$$\mu = -g \frac{e}{4\pi mc} s;$$

здесь  $\mu$  (греческая буква «мю») — магнитный момент электрона,  $s$  — спиновый момент количества движения,  $e$  — заряд,  $m$  — масса и  $c$  — скорость света в вакууме. Константой пропорциональности в этом уравнении является  $g$ -фактор, безразмерное число.  $g$ -фактор определяет величину магнит

ного момента, соответствующую данным величинам спина, заряда и массы. Знак минус перед  $g$ -фактором означает, что магнитный момент антипараллелен спиновому моменту количества движения.

В этой механической модели значение  $g$  решающим образом зависит от формы и размера электрона и от того, как распределен электрический заряд по его поверхности. Первые экспериментальные значения  $g$  были получены из тех же самых спектроскопических наблюдений, которые навели на мысль о существовании собственного спинового момента количества движения. Эти наблюдения показали, что  $g$  приблизительно равно 2. Позднее более усовершенствованный вариант квантовой теории, сформулированный П. А. М. Дираком в соответствии с требованиями специальной теории относительности, сделал возможным точное теоретическое вычисление величины  $g$ ; вычисленное значение  $g$  оказалось точно равным 2, в согласии с имевшимися в то время данными наблюдений.

□

Представление об электроне, как о твердом вращающемся теле, довольно наивно; в конце концов движение частицы должно описываться законами квантовой механики, в которой понятия размера и скорости не могут быть даже определены с точностью, превышающей некоторый уровень. Действительно, такая модель имеет серьезные недостатки, часть которых была выявлена уже через несколько дней после того, как эта модель была предложена. Например, оказывается, что скорость вращения у поверхности электрона больше скорости света. Другой источник трудностей связан с размером, приписываемым электрону. Масса или энергия электрически заряженной частицы обратно пропорциональна ее размеру. Одну из причин этого можно понять, заметив, что для упаковки отталкивающегося отрицательного заряда электрона в конечный объем требуется энергия. Чем меньше объем, тем больше необходимо энергии. В соответствии с этим весьма малая масса или энергия электрона означает, что его размер должен быть довольно большим. Однако эксперименты, в которых электроны рассеиваются на других частицах и фактически измеряется размер электрона, показывают, что его радиус должен быть чрезвычайно малым. Действительно, все экспериментальные данные, собранные до сих пор, согласуются с представлением об электроне, как о точечной частице, полностью лишенной протяженности. Следовательно, изложенные здесь доводы приводят к заключению, что масса электрона бесконечна, т. е. к очевидной нелепости.

Еще одна причина сомнений в правильности как этой механической модели, так и теории Дирака связана с уточненными измерениями  $g$ -фактора электрона. Экспериментальные данные показывают, что  $g$  не точно равно 2, а несколько больше 2, на величину примерно 0,1%; другими словами,  $g$ -фактор приблизительно равен 2,002. Теория Дирака не согласовывалась с таким уточнением.

В 1940-е годы эти проблемы были преодолены отказом от механической модели электрона и созданием новой, более абстрактной теории — квантовой электродинамики. В квантовой электродинамике допускается, что электрон — безразмерная точечная частица, чья масса, по крайней мере в принципе, может быть бесконечной. Как ни странно, существует математическая процедура (называемая перенормировкой), с помощью которой эта бесконечность уничтожается и извлекаются наблюдаемые, конечные свойства электрона, в том числе  $g$ -фактор.

Далеко не очевидно, как частица с нулевым радиусом может иметь спиновый момент количества движения или магнитный момент. Хотя квантовая электродинамика не предлагает никакой последовательной

мысленной картины, она, тем не менее, дает точный метод вычисления численных значений различных свойств электрона. Соотношение между магнитным моментом электрона и его спином, зарядом и массой имеет тот же самый вид, что и для механической модели, и константой пропорциональности в этом уравнении является тот же самый  $g$ -фактор. Более того, первое приближение все еще дает значение  $g = 2$ . Однако это всего лишь приближение, и к нему можно добавить бесконечный ряд последовательно уменьшающихся поправок. Точное значение  $g$  этим методом найти невозможно, так как в такой расчет пришлось бы включить все члены ряда, но можно достигнуть любой конечной точности, вычисляя конечное число членов.

□

Начиная с 1950 г., Х. Р. Крэйном с его коллегами и студентами в Мичиганском университете был предпринят ряд экспериментов по измерению  $g$ -фактора. В действительности измерялось не значение  $g$ , а различие между  $g$  и 2, так что этот проект стал известен как « $g$  минус 2»-эксперимент. В течение следующих двух десятилетий Крэйном, Артуром Ричем и их сотрудниками сообщалась последовательность все более точных значений  $g$ . (См. Crane H. R. «The  $g$ -Factor of the Electron». — Scientific American, 1968, v. 218, № 1, p. 72, перевод: УФН, 1968, т. 96, с. 154). В течение того же периода теоретики работали над вычислениями все более сложных членов в вышеупомянутом бесконечном ряде. Возникшая в результате борьба между теорией и экспериментом перемежалась несколькими ошибками и последующими исправлениями, но к 1972 г. вычисленные и измеренные значения  $g$  совпадали друг с другом лучше, чем в восьми значащих цифрах. Побочная польза от этого соревнования состояла в разработке новых методов как в теоретических вычислениях, так и в экспериментах. Оказалось, что каждый дополнительный десятичный разряд требует каких-либо технических нововведений.

В мичиганском эксперименте пучок электронов проходил через магнитное поле в устройстве, где ориентация спина электрона (или магнитного момента) могла определяться как перед прохождением, так и после него. Приложенное поле двояким образом влияло на электроны: оно вызывало прецессию их спинов, и оно заставляло сами электроны описывать круговые или спиральные орбиты. Если бы  $g$  точно равнялось 2, частота спиновой прецессии и орбитальная частота были бы равны. В эксперименте измерялась разность этих частот, и, следовательно, определялась разность  $g - 2$ .

Точность этого метода главным образом ограничивается статистической природой эксперимента, который проводится со многими взаимодействующими электронами, а также недостатком сведений о том, что происходит с электроном во время измерения. Каждый электрон движется сквозь устройство с высокой скоростью и в магнитном поле проводит время, много меньшее секунды. За это время его траектория может изменяться из-за неоднородностей магнитного поля и столкновений с другими электронами в пучке. Мичиганская группа продолжает усовершенствовать эксперимент, пытаясь контролировать эти неопределенности.

Другая стратегия усовершенствования измерений  $g$  состоит в заключении одиночного медленно движущегося электрона на длительный период в такое простое окружение, которое поддается точному анализу. Этот план принят в экспериментах с геониумом, выполненных в Вашингтонском университете. Цель этих экспериментов — цель, к которой можно приближаться, но которая никогда не будет достигнута — изолировать электрон от всех внешних влияний и все же оставить его доступным для исследова-

ния. Долговременное заточение свободных электронов было задумано более 20 лет назад Гансом Г. Демельтом в Вашингтоне, и работа, описанная здесь, была выполнена под его руководством. Методы получения и наблюдения изолированного электрона разработаны главным образом нами, хотя наша работа основывалась на экспериментах с захваченными в ловушки облаками электронов, выполненными нашими предшественниками — Фредом Л. Уолсом и Талбертом С. Стайном. После того, как мы оставили эту работу, одноэлектронные методы были еще больше усовершенствованы Робертом С. Ван Диком (мл.) и Паулем Б. Швинбергом, которые с высокой точностью измерили  $g$ -фактор.

□

Чтобы понять поведение электрона в атоме геонима, сначала полезно рассмотреть более простую, идеализированную систему: неподвижный электрон в однородном магнитном поле. Такое поле можно представить параллельными силовыми линиями, равноотстоящими друг от друга. Энергия этого неподвижного электрона зависит от ориентации его магнитного момента по отношению к направлению внешнего поля. Энергия минимальна, когда момент и поле параллельны и максимальна, когда они антипараллельны.

Оказывается, что эти две ориентации электрона, которые обычно называются «спин вниз» и «спин вверх», являются единственно возможными. Все промежуточные ориентации, при которых магнитный момент был бы перпендикулярен полю или пересекал бы его наклонно, запрещены правилами квантовой механики. (Точнее, эти правила относятся к ориентации направления спина и лишь косвенно к магнитному моменту. Однако, поскольку эти два вектора всегда точно антипараллельны, ориентация электрона может быть задана любым из них.)

Так как у электрона имеется лишь две возможные ориентации, неподвижный электрон в однородном магнитном поле имеет именно два различных энергетических уровня. Разность энергий этих уровней равна произведению трех величин. Одной из этих величин является комбинация фундаментальных констант, называемая магнетоном Бора, которая определяет связь между приложенным магнитным полем и магнитным моментом частицы. Магнетон Бора, по определению, равен постоянной Планка  $\hbar$ , умноженной на  $e/4\pi mc$ . Другие две величины, которые определяют уровни энергии электрона, — это напряженность внешнего поля и  $g$ -фактор. Любое измерение  $g$ -фактора в конце концов предусматривает измерение разности энергий этих уровней в ситуации, когда также можно определить напряженность приложенного поля. Практически в экспериментах удается обойтись даже без точных измерений напряженности магнитного поля.

Рассматривать неподвижный электрон удобно, но это вымышленное удобство; согласно принципу неопределенности квантовой механики, никакая частица, столь легкая как электрон, не может оставаться неподвижной очень долго. Однако, если электрон всегда должен двигаться, магнитное поле может, по крайней мере, ограничить его движение определенной областью. Ограничение происходит из-за взаимодействия поля с зарядом частицы. Если электрон движется перпендикулярно полю, то возникает сила, толкающая его перпендикулярно как первоначальному направлению движения, так и направлению поля. В результате траектория электрона изгибается в окружность (рис. 3).

Когда энергия и скорость электрона возрастают, возрастает также и диаметр круговой орбиты. Действительно, скорость и диаметр орбиты изменяются согласованно таким способом, что время, требующееся на один оборот, почти не меняется. Другими словами, период движения электрона

трона постоянный (или почти постоянный), независимо от его скорости или энергии. Постоянство орбитального периода нарушается только релятивистским эффектом — при высокой скорости масса электрона возрастает и поэтому период обращения становится несколько больше. Однако для электронов низкой энергии релятивистская поправка мала. Орбитальное движение электрона в магнитном поле называется циклотронным, поскольку оно используется в циклотроне для ускорения электронов или других заряженных частиц.

И здесь вмешательство квантовомеханических законов модифицирует движение электрона. В классической, или доквантовой, физике

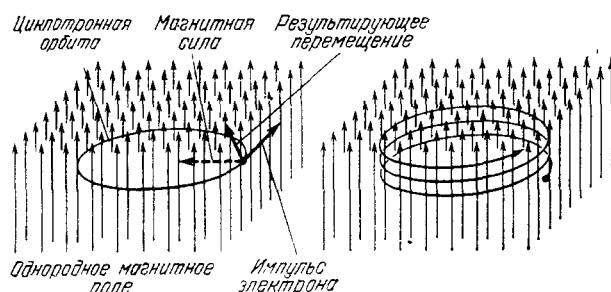


Рис. 3. Ограничение движений электрона в магнитном поле вызывается действием поля на движущийся электрический заряд.

На электрон действует сила, направленная перпендикулярно как полю, так и направлению движения частицы. Постоянное действие этой силы отклоняет электрон на круговую траекторию, которая называется циклотронной орбитой. По мере того как энергия и скорость электрона возрастают, размер орбиты возрастает дискретными ступенями. Благодаря этому механизму электрон вынужден вращаться в конечной области поля, но его движение еще не полностью ограничено; он еще имеет возможность дрейфовать параллельно силовым линиям поля, так что его траектория становится спиралью.

электрон, вращающийся по окружности в магнитном поле, может иметь любую произвольную энергию и таким образом, может иметь орбиту любого диаметра. В квантовой теории допускаются лишь определенные дискретные энергии и размеры орбит. Имеется наименьшая возможная орбита, за которой следует последовательность больших орбит, связанных с увеличивающимися энергиями; орбиты промежуточных размеров запрещены. Каждая из разрешенных орбит характеризуется квантовым числом  $n$ , которое может быть только целым числом из ряда 0, 1, 2, 3 и т. д.

Поскольку циклотронные орбиты квантованы, диаграмма разрешенных энергетических уровней электрона имеет вид лестницы. Нижняя ступенька соответствует наименьшей орбите с наименьшей энергией, а каждая последующая ступенька представляет следующую, большую орбиту и следующее, более высокое энергетическое состояние. Что наиболее важно, расстояние между ступеньками почти одно и то же (оно в точности одно и то же, если можно пренебречь релятивистскими эффектами). Разность энергий (соседних) ступенек равна удвоенному произведению магнетона Бора на напряженность приложенного магнитного поля. Это те же самые величины, которые фигурируют в выражении для разности энергий состояний «спин вверх» и «спин вниз» с одним существенным изменением:  $g$ -фактор заменен точным целым числом 2. Подобие двух формул наводит на мысль о способе измерения  $g$ , или, по крайней мере, измерения отношения  $g$  к 2, без точного определения напряженности магнитного поля или величины магнетона Бора. Все что требуется — это измерить при одних и тех же условиях разность энергий спиновых состояний

и энергетический промежуток между соседними орбитальными состояниями. Деление одной энергии на другую дает отношение, в котором магнетон Бора и напряженность поля появляются как в числителе, так и в знаменателе, и, следовательно, они сокращаются.

□

В действительности не существует способа «выключить» спин на время измерения размера орбиты, а также невозможно уговорить электрон остаться неподвижным, в то время как измеряется энергия его спиновой ориентации. Любое реальное состояние электрона имеет энергию, определяемую как его орбитой, так и ориентацией его спина. Эти комбинированные состояния удобно отобразить двумя расположенными рядом энергетическими лестницами. Одна лестница представляет все состояния со спином вверх, а другая — все состояния со спином вниз. В каждой лестнице ступеньки соответствуют последовательно увеличивающимся орбитам, и эти ступеньки обозначены главным квантовым числом  $n$ . Расстояние между любыми двумя ступенями одно и то же в обеих лестницах, но одна лестница целиком смещена относительно другой на величину, равную энергии, необходимой для переворота спина. Так как эта энергия приблизительно равна расстоянию между ступеньками, одна лестница начинается выше другой примерно на высоту одной ступеньки (рис. 4).

В этой системе возможны три вида переходов между состояниями. Допустим, что электрон имеет наинизшую возможную энергию: его спин направлен вниз, так что магнитный момент параллелен полю, а его циклотронная орбита является наименьшей возможной, с  $n = 0$ . Следовательно, электрон занимает самую низшую ступеньку более низкой энергетической лестницы. Переход первого типа оставил бы спиновую ориентацию неизменной, но увеличил бы орбиту до следующего допустимого размера; этот переход соответствует подъему на одну ступеньку той же самой энергетической лестницы, т. е. в состояние с  $n = 1$ . Энергия, необходимая для такого перехода, равна расстоянию между ступеньками и, следовательно, дается произведением 2 на магнетон Бора и на напряженность поля.

Достигнув этого уровня, электрон с помощью перехода другого типа мог бы перевернуть спин без изменения орбиты, переходя таким образом с уровня  $n = 1$  лестницы, соответствующей спину вниз, на аналогичный уровень  $n = 1$  лестницы, соответствующей спину вверх. Энергия, необходимая в этом случае, равна произведению  $g$  на магнетон Бора и на напряженность поля. Третья возможность состоит в изменении размера орбиты на единицу с одновременным переворотом спина. Например, электрон мог бы шагнуть со ступеньки  $n = 1$  лестницы, соответствующей спину вниз, прямо на ступеньку  $n = 0$  лестницы, соответствующей спину вверх. Эти уровни почти совпадают; энергия, необходимая для переворота спина в антипараллельную ориентацию, почти компенсируется энергией, освобождающейся, когда размер орбиты сокращается на одну единицу. Поэтому для такого перехода требуется лишь небольшая разность этих энергий. Она равна произведению  $(g - 2)$  на магнетон Бора и на напряженность поля.

Энергию, необходимую для всех этих изменений состояния, удобно выражать через частоту электромагнитного излучения, которое индуцирует соответствующий переход. Любую частоту можно выразить в энергетических единицах умножением на постоянную Планка, но для наших целей не требуется даже такого преобразования. Саму частоту можно использовать вместо энергии. Частота, необходимая для переворота спина, пропорциональна  $g$ , константе, определяющей разность энергий спиновых



состояний. Точно так же частота излучения, которое изменяет размер циклотронной орбиты на единицу, пропорциональна 2, константе, определяющей расстояние между ступеньками отдельной энергетической лестницы. Для типичных применяемых магнитных полей обе эти частоты

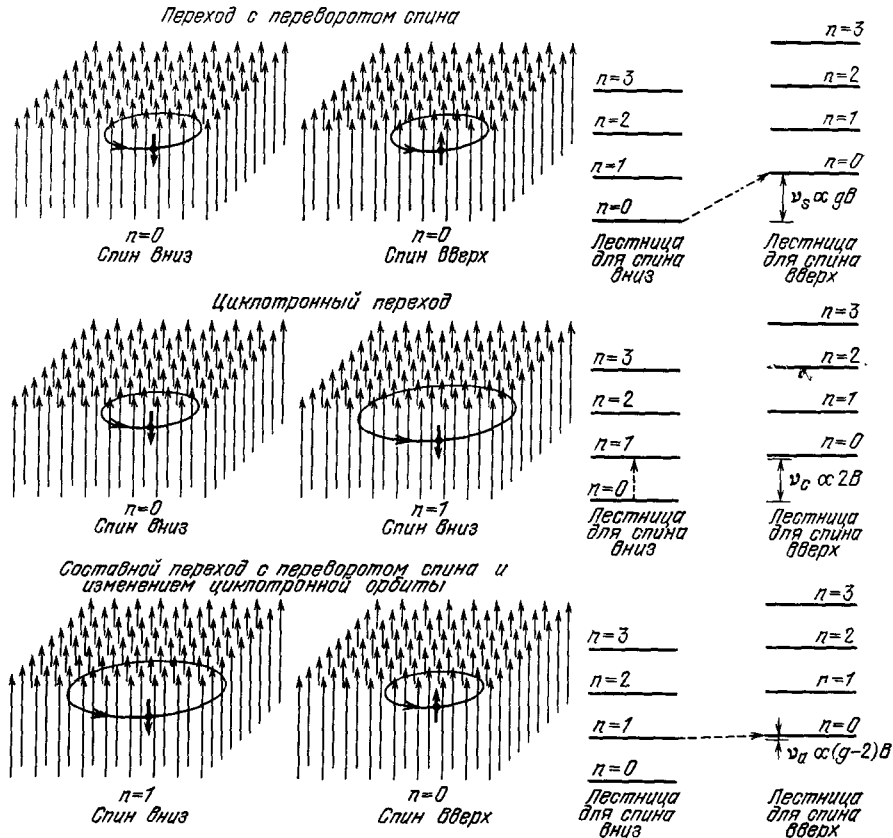


Рис. 4. Энергетические состояния электрона зависят от размера циклотронной орбиты (задаваемого значением квантового числа  $n$ ) и от ориентации вектора спина частицы (обозначенной «вверх» и «вниз»).

Для каждой ориентации спина имеется ряд почти равноотстоящих энергетических уровней, соответствующих различным циклотронным орбитам. Диаграмма этих двух рядов уровней представляет собой две лестницы, одна из которых сдвинута по вертикали относительно другой на величину, слегка превышающую одну ступеньку. Энергетические интервалы между состояниями пропорциональны напряженности приложенного магнитного поля ( $B$ ); множитель пропорциональности различен для каждого вида переходов между состояниями. Если переворачивается снизу вверх спин электрона, изменение энергии пропорционально  $g$ . Если на единицу увеличивается размер циклотронной орбиты, требуемая энергия пропорциональна 2. При составном переходе, когда одновременно переворачивается спин и уменьшается размер циклотронной орбиты, необходимое количество энергии пропорционально разности этих множителей, т. е.  $g - 2$ . Поскольку величина  $g$  близка к 2, это количество энергии небольшое.

лежат в микроволновой области электромагнитного спектра. Разность этих частот, называемая аномальной частотой, индуцирует двойной переход, при котором спин и диаметр орбиты изменяются одновременно. Следовательно, аномальная частота пропорциональна  $g - 2$ . Так как  $g$  превышает 2 лишь на  $\sim 0,1$  процента, аномальная частота примерно в 1000 раз меньше частоты циклотронного перехода.

□

Теперь методику измерения  $g$ -фактора можно описать с помощью частот излучений. Необходимо измерить две величины: частоту циклотронного перехода и аномальную частоту. Действительные значения обеих частот зависят от напряженности магнитного поля и от принятого значения магнетона Бора; поэтому эти частоты невозможно предсказать с точностью, превышающей точность, с которой известны эти величины. Однако в отношении указанных частот оба эти множителя сокращаются и единственными остающимися существенными величинами являются константы пропорциональности, которые определяют расстояния между уровнями в лестничной диаграмме. Для аномальной частоты такая константа равна  $g - 2$ , а для частоты циклотронного перехода — точно 2. Следовательно, отношение этих двух частот равно  $(g - 2)/2$ . Умножение на 2 и добавление 2 дает само значение  $g$ -фактора.

Этот метод нахождения  $g$ -фактора может показаться без необходимости окольным. Почему не измерить непосредственно частоту перехода с переворотом спина, которая прямо пропорциональна  $g$ , и сразу получить желаемую величину? Частичный ответ заключается в значительном преимуществе, которое основано на работе с безразмерным отношением. Предположим, что частота перехода с переворотом спина измерена с точностью в восемь десятичных разрядов. Чтобы найти  $g$ -фактор, эту частоту нужно умножить на постоянную Планка и разделить на магнетон Бора и напряженность магнитного поля. Упомянутые восемь десятичных разрядов будут оставаться существенными только, если все эти величины известны по крайней мере с той же самой точностью. При вычислении отношения частот все эти дополнительные величины устраняются, так что точность результата определяется только точностью измерений частоты.

Имеется еще один аргумент в пользу косвенного метода. Поскольку, как известно, величина  $g$  очень близка к 2, извлечение значения  $g$  из измерения  $g - 2$  дает большое увеличение точности. Если  $(g - 2)/2$  известно до восьми значащих цифр, то умножение на 2 и добавление 2 дает значение  $g$ -фактора, точное до 11 значащих цифр. Этот кажущийся парадокс точности, получаемой без дополнительных затрат, можно объяснить различными способами. Одно объяснение состоит в том, что аномальная частота в 1000 раз меньше, чем частота перехода с переворотом спина, так что измерение с данной относительной точностью дает много меньшую ошибку в герцах. Другой способ объяснения состоит в том, что при всяком измерении аномальной частоты расстояние между циклотронными уровнями, пропорциональное точно 2, вычитается самой физической системой, а не экспериментатором; в результате требуется измерить лишь небольшое отличие от 2. Ситуация, в которой находится экспериментатор, в некоторой степени подобна положению землемера, которого попросили проложить линию длиной 1001 метр. Это расстояние можно измерить метр за метром, но гораздо легче достичь высокой точности с помощью цепи, длина которой точно 1 километр. Тогда эту длину можно вычесть из общего расстояния и с высокой точностью необходимо измерить лишь один метр.

□

Методику измерения  $g$ -фактора, принятую в Вашингтонском университете, можно кратко описать следующим образом. Сначала электрон закладывается в однородное магнитное поле, а затем его движение в этом поле анализируется с целью определения двух величин: частоты приложенного излучения, при которой изменяется размер орбиты, и частоты,

при которой происходит одновременное изменение размера орбиты и ориентации спина. Из отношения этих частот  $g$ -фактор определяется с помощью тривиальных арифметических операций. Этот конспект действительно излагает принципы эксперимента, но он несколько напоминает известный рецепт тушеного говяжьего мяса, который начинается так: «Возьмите одного среднего слона...». Большая часть работы опущена, а с нею и большинство трудностей.

Один недостаток эксперимента в том виде, как он был описан до сих пор, состоит в том, что электрон нельзя удержать только лишь

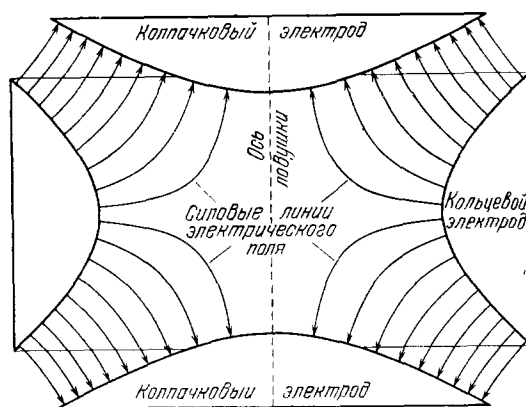


Рис. 5. На однородное магнитное поле наложено электрическое поле, вызываемое напряжением, приложенным к электродам ловушки.

Так как электрон заряжен отрицательно, в электрическом поле на него действует сила, направленная противоположно силовым линиям поля. Эта сила имеет вертикальную составляющую и потому электрон, который дрейфует по направлению к любому из колпачковых электродов, отталкивается обратно к средней плоскости. В общем случае электрон будет проскакивать среднюю плоскость и, таким образом, будет колебаться параллельно оси ловушки. Электрическое поле имеет также радиальную компоненту, которая заставляет электрон двигаться к кольцевому электроду. Однако радиальному движению препятствует действие магнитного поля, которое отклоняет электрон на круговую орбиту, называемую магнетронной орбитой. Следовательно, в такой комбинации электрического и магнитного полей электрон полностью взят в плен, но его движение усложнено.

магнитным полем. В однородном магнитном поле электрон не может мигрировать поперек силовых линий поля, но ничто не мешает электрону дрейфовать параллельно полю, и, следовательно, ускользнуть. Необходимо что-то, что закупоривало бы концы ловушки; мы в Вашингтонском университете использовали для этих целей электрическое поле, наложенное на магнитное поле в конфигурации, называемой ловушкой Пеннинга (рис. 5).

Электрическое поле формируется напряжением, приложенным к трем электродам, а именно, к колпачкам на каждом конце ловушки и к кольцу, опоясывающему среднюю плоскость. Обоим колпачкам сообщается отрицательный заряд, а кольцо заряжено положительно. В образующейся комбинации электрического и магнитного полей электрон заперт во всех трех измерениях. Если он дрейфует горизонтально, магнитное поле отклоняет его на круговую орбиту. Если электрон странствует вертикально, параллельно силовым линиям магнитного поля, он отражается электрическим полем при приближении к отталкивающему отрицательному заряду колпачкового электрода.

В общем случае электрон, отраженный от одного колпачкового электрода, проскочит среднюю плоскость и затем будет отброшен полем у противоположного конца ловушки, и при этом снова проскочит среднюю

плоскость. Таким образом могут возникнуть колебания вдоль оси симметрии ловушки. Чтобы частота этих колебаний не зависела от амплитуды, электроды должны иметь определенную форму. Они должны быть гиперboloидами вращения с осью, совпадающей с осью ловушки.

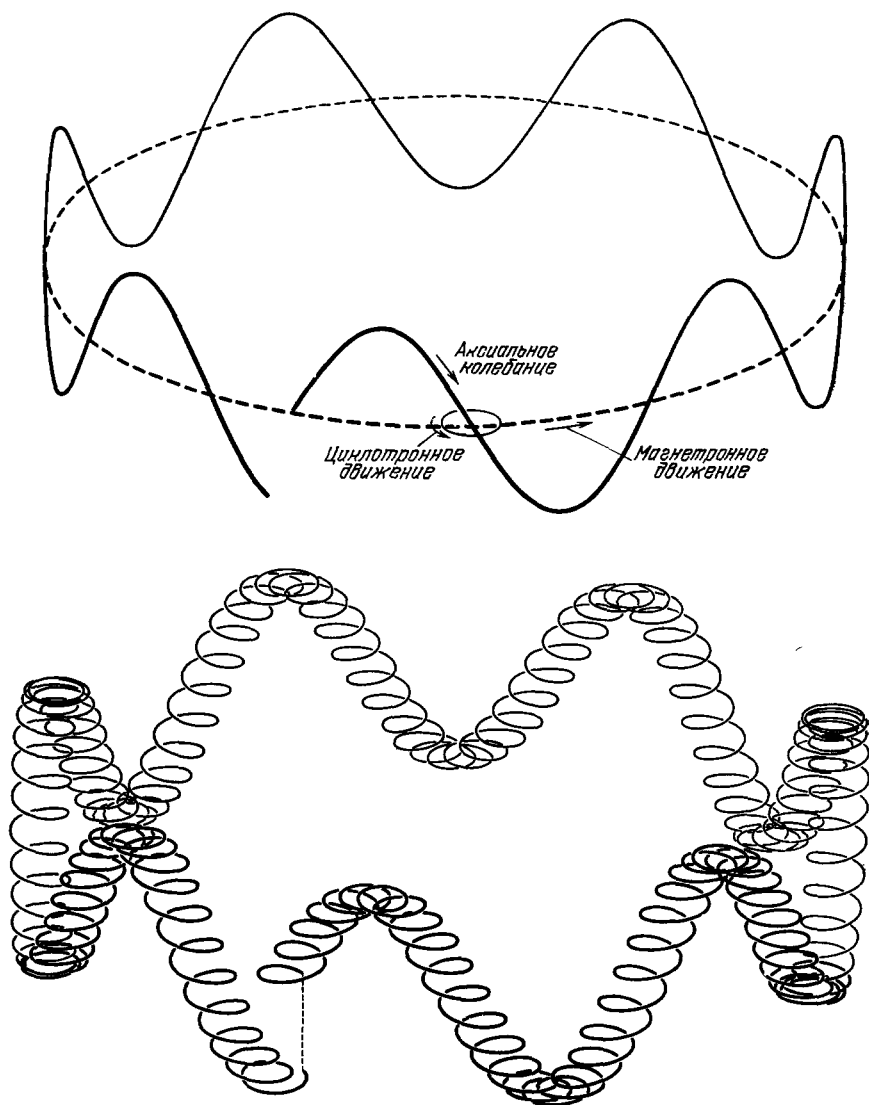


Рис. 6. В ловушке комбинируются три типа движения электрона, образуя сложную траекторию.

Электрон быстро вращается по циклотронной орбите; в то же самое время центр циклотронной орбиты следует по много большему круговому пути магнетронного движения; все время электрон колеблется параллельно оси ловушки. Ни частоты, ни амплитуды различных типов движения не показаны в масштабе. В типичном случае электрон в каждой магнетронной орбите совершает около 2000 аксиальных колебаний и 1,4 миллиона циклотронных оборотов.

Добавление электрического поля усложняет движение захваченной частицы. Электрон продолжает быстро кружиться вокруг силовых линий магнитного поля, что представляет собой циклотронное движение. На это орбитальное движение теперь накладываются аксиаль-

ные колебания, параллельные силовым линиям магнитного поля. Кроме того, взаимодействие электрического и магнитного полей приводит к третьему типу движения. Электрическое поле не только создает вращающую силу, которая ограничивает движение электрона вдоль оси симметрии; оно также имеет радиальную компоненту, которая толкает электрон от центра ловушки к кольцевому электроду. Эта радиальная сила позволила бы электрону ускользнуть, если бы не магнитное поле, которое препятствует этому с помощью того же самого механизма, что вызывает циклотронное вращение. Благодаря воздействию магнитного поля радиальная сила, действующая на электрон, преобразуется в силу, приводящую к дрейфу вдоль окружности, так что электрон отклоняется на круговой путь.

Это последнее возмущение, накладывающееся на траекторию электрона, называется магнетронным движением в соответствии с названием генерирующего микроволны прибора, в котором такое движение играет важную роль. Магнетронная орбита много больше, чем циклотронная, но электрон движется по ней гораздо медленнее. (Слова «больше» и «медленнее» здесь употреблены лишь в целях сравнения. В типичном случае электрон совершает около 35 000 оборотов в секунду, а в каждом из этих оборотов он описывает 1,4 миллиона циклотронных орбит.) Магнетронное движение слегка видоизменяет все энергетические состояния электрона, сдвигая все уровни лестничной диаграммы. Однако эти сдвиги малы, и их можно вычислить, а также измерить экспериментально. Следовательно, при точных измерениях  $g$ -фактора можно ввести поправку на влияние магнетронного движения.

Таким образом, траектория электрона в ловушке Пеннинга состоит из трех компонент (рис. 6). Электрон быстро вращается по малым петлям (циклотронное движение), а центр этих петель медленно продвигается по большому кругу (магнетронное движение). В то же самое время электрон колеблется взад и вперед вдоль оси ловушки, перпендикулярно плоскости, в которой лежат циклотронные и магнетронная орбиты. В целом движение аналогично движению карнавального аттракциона, называемого качающейся каруселью (Tilt-a-whirl), когда повозка вертится по малому кругу на поворотном круге, который описывает большую окружность и в то же время качается в последовательности волнообразных движений.

□

В каком смысле эту систему можно рассматривать как атом, оправдывая название геониум? Главным образом эта система подобна атому тем, что электрон связан силовым полем, похожим на поле атомного ядра. Движение электрона в этом поле квантовано, и переходы между различными типами движений соответствуют определенным частотам излучения. Другими словами, захваченный электрон имеет спектр, который можно исследовать точно так же, как исследуется спектр атома.

Создать искусственный атом — это очень хорошо, но если этот атом должен быть сколько-нибудь полезен для измерений, то должен существовать способ наблюдения его спектра. Одиночный атом не может испускать или поглощать много излучения; действительно, это количество так мало, что его едва можно зарегистрировать и оно много меньше точно измеримого. Оказывается, имеется более реальный способ наблюдать движение электрона; ключом способа являются аксиальные колебания, которые наводят слабые токи в электродах ловушки. Эти токи можно зарегистрировать в цепях, к которым подключены электроды.

Электрические характеристики ловушки Пеннинга можно анализировать с помощью эквивалентного контура — схемы из таких эле-

ментов, как сопротивления, конденсаторы и индуктивности, которая может заменить ловушку и имитировать все ее свойства (рис. 7). При таком анализе ловушка рассматривается как черный ящик, внутреннее устройство которого экспериментатор не знает; он видит лишь три вывода, соответствующие двум колпачковым электродам и кольцевому электроду.

Когда ловушка пуста, эквивалентный контур состоит из небольших конденсаторов, соединяющих эти три электрода. Если сверху ловушки приложить высокочастотный сигнал к верхнему колпачковому электроду

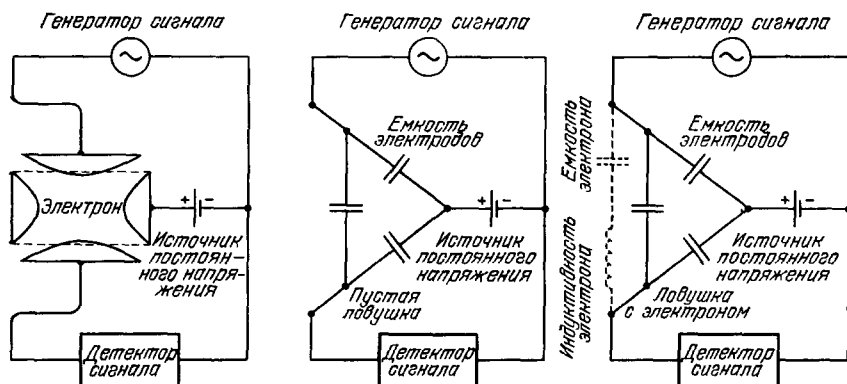


Рис. 7. Эквивалентный контур определяет схему соединений элементов, которая может воспроизвести электрические свойства ловушки.

Движение электрона наблюдается с помощью приложения радиочастотного сигнала вверху ловушки и регистрации прошедшей части сигнала внизу. Когда ловушка пуста, электроды соединены лишь малыми емкостями. Сигнал, прошедший через эти емкости, компенсируется во внешней схеме. Электрон в ловушке производит такой же эффект, как малая емкость и большая индуктивность, соединяющие колпачковые электроды. Через эти воображаемые элементы контура сигнал проходит к детектору. В действительности сигнал, приложенный к верхнему электроду, возбуждает аксиальные колебания электрона, которые индуцируют ток той же частоты в нижнем электроде.

и кольцу, некоторый слабый след сигнала будет передан дну ловушки через емкость между колпачковыми электродами. Прошедший сигнал можно зарегистрировать приемником, подключенным между нижним колпачком и кольцом.

Захват единственного электрона разительно меняет эквивалентный контур. Когда ловушка содержит электрон, она ведет себя как резонансный контур, состоящий из соединенных последовательно конденсатора и большой индуктивности, который подключен между двумя колпачковыми электродами. Хотя вклад этих воображаемых элементов контура в пропускание сигнала меньше, чем вклад емкостей ловушки, этот новый путь имеет отличительные свойства, которые позволяют выделить и измерить сигнал, обусловленный электроном.

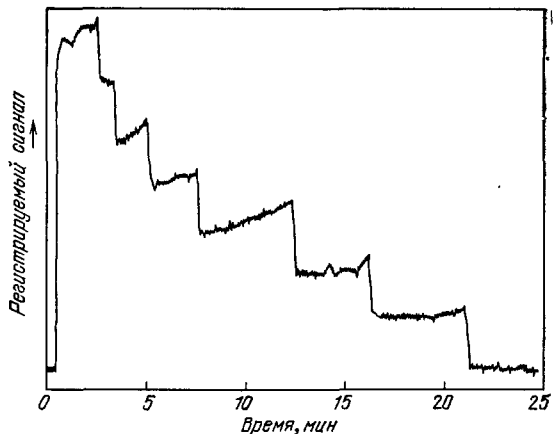
В типичных рабочих условиях индуктивность эквивалентного контура, представляющего электрон, равна приблизительно 10 000 генри, величина, которая была бы у большой катушки проволоки; в действительности такая большая индуктивность обычно не бывает в высокочастотном контуре. Конечно, никакой катушки проволоки не существует; индуктивность просто отражает небольшую инерцию захваченного электрона. В действительности в ловушке электрон реагирует на приложенный радиочастотный сигнал колебаниями, синхронными с сигналом, и тем самым индуцирует копию сигнала в нижних электродах. Имеется строгое ограничение на максимальную мощность, которую можно передать таким путем: если колебания электрона станут слишком большими, частица столкнется

с электродами и исчезнет. Можно сказать, что этот резонансный контур легко стораит. Чтобы регистрировать даже самые большие сигналы, которые может передать захваченный электрон, необходим чувствительный приемник.

Мы впервые наблюдали недвусмысленное доказательство существования одиночного захваченного электрона с помощью регистрации малых наведенных токов. После откачки ловушки с целью получения хорошего вакуума, в нее было запущено небольшое число электронов от нагретой нити накала. К верхней части ловушки прикладывалось радиочастотное

Рис. 8. Запись сигнала от семи электронов, запертых в ловушке, полученная регистрацией тока, индуцированного аксиальными колебаниями.

Амплитуда приложенного сигнала был близка к максимальной, допустимой электронами. По мере того, как электроны исчезали по одному за раз, наблюдалось семь снижений индуцированного тока. При меньшей амплитуде электрон мог оставаться запертым в течение недель.



напряжение, амплитуда которого доводилась почти до максимума, допустимого электронами. Затем измерялся сигнал, достигший дна ловушки (рис. 8). Спустя несколько минут выходной сигнал немного уменьшился, затем он держался постоянным в течение еще нескольких минут и снова упал. За время около получаса было семь снижений амплитуды принятого сигнала, все приблизительно одной и той же величины, и после последнего снижения сигнал вернулся к уровню фона, характерному для пустой ловушки. Конечно, то, что мы наблюдали,— это исчезновение отдельных электронов из совокупности тех семи, которые, очевидно, первоначально наполняли ловушку. В последующих экспериментах мы обнаружили, что если возбуждающее напряжение снижалось, когда оставался только один электрон, этот последний электрон мог оставаться в ловушке и наблюдаться в течение многих недель.

□

Долговременное удержание одиночного электрона являлось волнующим результатом и великолепной забавой, но это был только первый шаг к измерению спектра геониума и, следовательно, к определению  $g$ -фактора. Прежде чем предпринимать точные измерения, нужно было внести ряд усовершенствований в устройство аппарата; в процессе некоторых из этих изменений к нам присоединились Ван Дик и Швинберг, а позднее они возглавили работу.

Конфигурация электрического поля оказалась критичной, и чтобы ее лучше контролировать, была сконструирована новая ловушка с пятью электродами вместо трех. Два дополнительных кольцевых электрода, размещенные в промежутках между первоначальными колпачковыми и кольцевыми электродами, позволяют электрическим способом компенсировать небольшие искажения поля. Нить накала, которая имела тен-

денцию портить вакуум всякий раз, когда вводилась новая партия электронов, была заменена острием — источником автоэлектронной эмиссии. Весь аппарат был реконструирован с целью его установки в трубку диаметром полтора дюйма, так что его можно было вводить внутрь мощного сверхпроводящего магнита. Этот магнит нужно было охлаждать жидким гелием, а для охлаждения ловушки до четырех градусов Кельвина применялся отдельный гелиевый объем. Охлаждение уменьшало тепловые флуктуации движения электрона и способствовало поддержанию высокого вакуума. Эти практические подробности, которые в нашем рассказе могут показаться обыденными, поглотили большую часть из нескольких лет усилий, затраченных на эту работу.

Одна из необходимых модификаций была фундаментальной природы: в первоначальном аппарате не было никакого средства для обнаружения

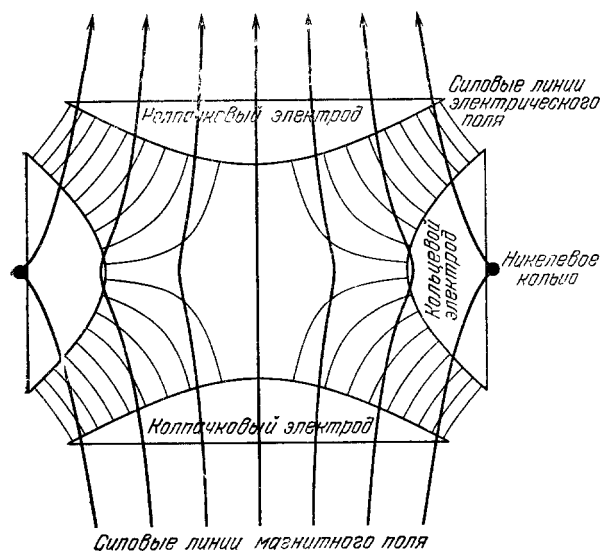


Рис. 9. Магнитная бутылка в ловушке образуется с помощью кольца из никеля (ферромагнитный металл), которое слегка искажает наложенное однородное магнитное поле.

Из-за кольца силовые линии отклоняются наружу в средней плоскости ловушки и эффектно сходятся у ее концов. Эта конусообразность поля вносит дополнительный вклад в возвращающую силу, с которой связаны аксиальные колебания электрона. Величина этой дополнительной силы зависит от размера циклотронной орбиты и от ориентации спина, так что изменения этих параметров приводят к небольшим сдвигам частоты аксиальных колебаний. Вследствие этой связи трех типов движения электрона, измеряя частоту аксиальных колебаний, можно определить в каком энергетическом состоянии он находится.

изменений размеров циклотронной орбиты или ориентации спина. Частоты, при которых имеют место такие изменения, — как раз то, что мы намеревались определять. Легко измеряется только частота аксиальных колебаний, а в однородном магнитном поле эта частота не зависит от размера циклотронной орбиты и направления спина. В конце концов мы пришли к решению придумать способ связи аксиальной частоты с энергией электрона.

Эта связь была осуществлена введением в среднюю плоскость ловушки кольца из никеля (ферромагнитного металла), которое окружало первоначальный кольцевой электрод (рис. 9).

Никелевое кольцо изгибало силовые линии магнитного поля в средней плоскости, так что напряженность поля была несколько больше у концов ловушки; такая конфигурация поля называется магнитной бутылкой. Если бы не было аксиальных колебаний, так что электрон оставался бы в средней плоскости, то магнитная бутылка не оказывала бы никакого действия. Однако при каждом отклонении от средней плоскости небольшое сгущение силовых линий магнитного поля несколько усиливает действие электрического поля, отталкивающего электрон назад к центральной плоскости. Благодаря этой дополнительной возвращающей силе частота аксиальных колебаний возрастает.



Суммарная сила взаимодействия электрона и искаженного магнитного поля зависит от энергии циклотронной орбиты и от ориентации спина. Влияние этого поля больше, когда размер орбиты больше или когда спин направлен вверх. По этой причине величина сдвига аксиальной частоты изменяется при каждом изменении размера циклотронной орбиты или состояния спина. Искажение магнитного поля должно быть слабым, иначе исследуемые энергетические уровни будут слишком изменены, но для того, чтобы сделать заметными изменения квантового состояния, достаточно лишь небольшого сдвига аксиальной частоты. В типичном случае аксиальные колебания имеют частоту 60 мегагерц, а частотный сдвиг, обусловленный магнитной бутылкой — несколько герц.

□

В идеальном эксперименте электрон сохранял бы стационарное движение по данной циклотронной орбите и данную ориентацию спина до тех пор, пока экспериментатор не сообщит энергию, необходимую для изменения этого состояния. Следовательно, график энергии электрона в функции времени представлял бы собой ряд четких ступеней, которые все получены под контролем экспериментатора, и был бы прямой линией между ступеньками. В действительности эксперимент проходит совсем иначе. Даже при четырех градусах Кельвина средняя энергия теплового возбуждения электрона эквивалентна нескольким ступенькам лестницы циклотронных состояний. Из-за этих беспорядочных тепловых возмущений электрон все время увеличивает и уменьшает энергию, на какой бы энергетической лестнице он ни оказался. В результате график энергии в функции времени напоминает всходы травы: уровень корней соответствует самой низкой ступеньке лестницы, а травинки — это переходы на более высокие энергетические ступеньки. Любое измерение энергетических уровней приходится делать на фоне этого теплового шума.

Измерение проводится путем тщательного поиска частот, которые производят наибольшие изменения этой быстро флуктуирующей картины. Сначала подается сигнал с частотой вблизи частоты циклотронного перехода и контролируется средняя высота «травы». Затем частота приложенного сигнала медленно перестраивается в узком диапазоне. Когда частота точно соответствует интервалу между ступеньками энергетической лестницы, электрон сильно поглощает энергию и поднимается выше по крайней мере на несколько ступенек. Таким образом, частота циклотронного перехода — это частота, которая дает самую высокую «траву» (рис. 10).

При измерениях аномальной частоты фон теплового шума менее вреден. Переход, который требуется наблюдать в данном случае, является составным переходом (должны изменяться как направления спина, так и размер орбиты), а такой спонтанный переход гораздо менее вероятен. Спин вообще не переворачивается, пока экспериментатор не сделает что-либо, что заставит спин перевернуться, и поэтому все тепловые переходы электрона обычно заключены в пределах одной из лестниц энергетической диаграммы. Чтобы индуцировать побочный переход между лестницами, нужно приложить сильный сигнал.

Каким образом экспериментатор может узнать ориентацию спина в данный момент времени, или, другими словами, узнать, на какой из энергетических лестниц находится электрон? Необходимая для ответа информация может быть получена из самой энергетической диаграммы: вспомните, лестница, соответствующая спине «вниз», простирается приблизительно на одну ступеньку ниже, чем лестница, соответствующая спине «вверх». Поэтому уровень корней травы располагается при более низкой

энергии, когда спин направлен вниз. Аномальной частотой является та, которая изменяет уровень корней наиболее часто.

После того как частота циклотронного перехода и аномальная частота измерены, для того, чтобы вычислить  $g$  остается только делить, умножать

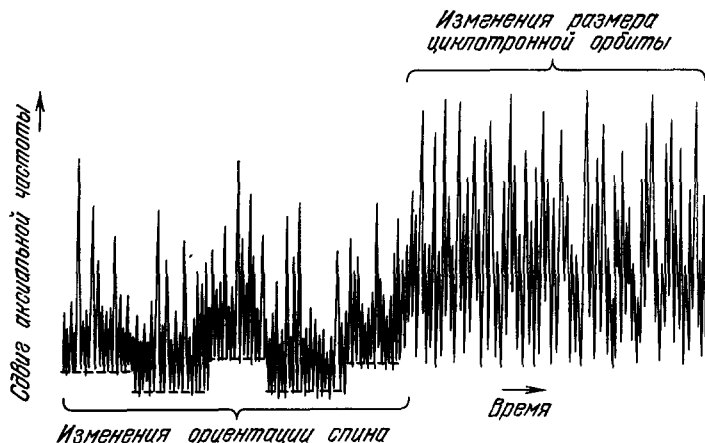


Рис. 10. Запись частотного сдвига аксиальных колебаний дает график, который напоминает всходы травы.

Из-за тепловых флуктуаций размер циклотронной орбиты все время изменяется, вызывая быстрые и беспорядочные отклонения аксиальной частоты — это травинки. Перевороты ориентации спина происходят гораздо реже и они наблюдаются как изменения уровня корней травы.  $g$ -фактор определяется с помощью воздействия на электрон электромагнитным полем и измерения двух частот: частоты, вызывающей изменения размера орбиты и, следовательно, дающей самую высокую траву, и частоты, которая переворачивает спин (с одновременным изменением размера орбиты) и, следовательно, дает наибольшую скорость изменений уровня корней.

на 2 и прибавлять 2. Эти две частоты даже в шумовом фоне можно определить точно, потому что оба резонанса очень острые, т. е. небольшое изменение приложенной частоты вызывает большие изменения числа наблюдаемых переходов в единицу времени. Прибор, генерирующий эти обе

$$\begin{aligned} \nu_s &= \frac{g\mu_B B}{h} & \nu_c &= \frac{2\mu_B B}{h} & \nu_a &= \nu_s - \nu_c \\ \frac{\nu_a}{\nu_c} &= \frac{\frac{(g-2)\mu_B B}{h}}{\frac{2\mu_B B}{h}} = \frac{(g-2)}{2} \\ \frac{(g-2)}{2} &= 1,1596522 \cdot 10^{-3} \text{ [восемь значащих цифр]} \\ g &= 2 \left[ \frac{(g-2)}{2} \right] + 2 = 2,0023193044 \text{ [11 значащих цифр]} \end{aligned}$$

Рис. 11. При вычислениях  $g$ -фактора исходят из измеренных значений частоты циклотронного перехода ( $\nu_c$ ) и аномальной частоты ( $\nu_a$ ), которая равна разности между частотой переворота спина и  $\nu_c$ .

Обе частоты зависят от величины магнетона Бора ( $\mu_B$ ) и от напряженности приложенного магнитного поля ( $B$ ); в уравнение входит также постоянная Планка ( $h$ ). В отношении  $\nu_a$  и  $\nu_c$  эти величины сокращаются; остается отношение  $(g-2)/2$ . Умножая на 2 и добавляя 2, получаем само значение  $g$ ; более того, если отношение (частот) измеряться с точностью восемь значащих цифр, значение  $g$  определяется с 11 значащими цифрами.

частоты, в конечном счете основан на цезиевых атомных часах, но даже эта абсолютная калибровка прибора не определяет предел точности измерений. Поскольку обе частоты генерируются одним и тем же прибором и имеет значение только их отношение, в ошибку измерений вносит вклад лишь относительная ошибка в диапазоне используемых частот.

Так случилось, что мы оба уже оставили работу с геониумом к тому времени, когда этот аппарат был готов для точных измерений. О первых

результатах нам сообщил по телефону Ван Дик. Вскоре после того, как он впервые зарегистрировал переходы на аномальной частоте, он был способен сообщить уточненное значение  $g$ -фактора, и с тех пор он улучшил методику, чтобы получить точность в 10 десятичных разрядов. В настоящее время наиболее точное значение  $g = 2,0023193044$  с вероятной ошибкой меньше единицы последнего десятичного разряда (рис. 11). Все же впереди еще большее улучшение точности, связанное с дальнейшими усовершенствованиями метода. Теоретическое значение  $g$ , вычисленное согласно предписаниям квантовой электродинамики, точно соответствует экспериментальному и имеет примерно ту же самую ошибку.

□

Приведенное выше значение  $g$  является статистически взвешенным средним значением результатов измерений, проводившихся с несколькими электронами, однако результаты для отдельных электронов также согласуются в пределах единицы последнего десятичного разряда. Обнаружение согласия результатов при переходе от одного электрона к другому едва ли удивительно, но это обстоятельство не следует опускать как тривиальное.

Основным в представлении об элементарной частице вещества является предположение, что все частицы одного наименования совершенно тождественны. В этой статье мы неоднократно употребляли слово «электрон», подразумевая прототип, который повсюду во Вселенной воспроизводится в бесчисленных тождественных копиях. В предположении, что все копии тождественны, экспериментатор проводит измерения с любым электроном, который попадет под руку в лаборатории, или с любой их группой, и сообщает свои результаты как информацию о свойствах «электрона». Можно назвать такую линию поведения самонадеянной; во всяком случае не вредно проверить ее обоснованность. Хотя имеется много косвенных данных, наводящих на мысль, что все электроны тождественны, геониум дает одну из немногих возможностей провести прямую проверку.

Логическим продолжением измерений электронного  $g$ -фактора является измерение соответствующего числа для позитрона, положительно заряженной античастицы электрона. Прежние исследования позитронного  $g$ -фактора, выполненные Ричем с сотрудниками в Мичигане, затруднялись тем фактом, что позитронов несравненно меньше, чем электронов. С помощью методов, разработанных в Вашингтонском университете, такое измерение можно провести, по крайней мере, в принципе, с одним единственным позитроном, который был бы захвачен, образуя один атом антигеониума. Конечно, такой эксперимент не без проблем: позитроны образуются при радиоактивном распаде некоторых ядер и имеют большую энергию, их необходимо замедлить и поместить в ловушку без единого столкновения с обычным электроном, так как в противном случае позитрон и электрон уничтожат друг друга (аннигилируют). Эти трудности все же были преодолены Швинбергом. Предполагается, что  $g$ -фактор позитрона точно равен  $g$ -фактору электрона. Это предположение скоро будет подвергнуто строгой экспериментальной проверке.

Методика, развитая для исследования геониума, может применяться не только для измерения  $g$ -фактора, но и других свойств, и не только для электронов и позитронов, но также и для других частиц. Например, компенсированная ловушка Пеннинга может применяться как масс-спектрометр высокого разрешения — прибор, с помощью которого измеряют отношение массы частицы к ее заряду. Таким способом Ван Дик в настоящее время пытается уточнить измерения отношения массы электрона

к массе протона. Демельт считает, что одиночный тяжелый ион, заключенный в миниатюрную ловушку, может служить оптическим стандартом частоты, который был бы свободен от определенных недостатков, присущих теперешним стандартам. С этой целью Демельт и В. Нойхаузер, М. Хоэнштатт и П. Е. Тошек из Гейдельбергского университета изолировали и даже сфотографировали одиночный ион бария в ловушке, подобной ловушке Пеннинга. Общей целью всех этих усилий является наблюдение простейших элементов природы в их простейшем окружении, когда существует наибольшая надежда понять их.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Crane H. R.— Scientific American, January 1968, v. 218, No. 1, p. 72.  
Rich A., Uesley I. C.— Rev. Mod. Phys., 1972, v. 44, p. 250.  
Van Dyck R. S., Jr., Wineland D. I., Ekstrom R. S., Dehmelt H. G.  
— Appl. Phys. Lett., 1976, v. 28, p. 446.