

А. Иоффе

Электрон

Одна из составных частей атома — отрицательно заряженный электрон — была обнаружена еще в XIX в. В 1897 г. удалось, хотя и грубо, измерить заряд электрона; позднее измерена была его масса и еще позже были обнаружены другие его свойства — вращательный и магнитный моменты.

При освещении, в особенности ультрафиолетовым светом, отрицательно заряженное тело постепенно теряет свой заряд, а нейтральное — заряжается положительно. Явление это, называемое фотоэлектрическим эффектом или, короче, фотоэффектом, было исследовано Столетовым еще в XIX в. Характер испускаемых телом при фотоэффекте зарядов — электронов — особенно наглядно виден в поставленном мной в 1912 г. опыте, который был видоизменением уже ранее применявшихся устройств.

В пространстве между двумя параллельными горизонтальными пластинами *A* и *B* (рисунок 1) попадали мелкие заряженные металлические пылинки *о*. Если частичка оказывается заряженной отрицательно, то ее можно удержать от падения, зарядив верхнюю пластину положительно, а нижнюю — отрицательно.

Эта статья — отрывок из книги А. Ф. Иоффе «Основные представления современной физики» (М.— Л., ГИТТЛ, 1949). Мы помещаем его с небольшими изменениями и дополнениями. Дополнения напечатаны мелким шрифтом.

Положительно заряженная пылинка удерживается полем противоположного знака. Можно подобрать такую разность потенциалов U_1 между пластинами, чтобы электрическая сила как раз уравнивала силу тяжести. Тогда пылинка повисает неподвижно на много часов.

Электрическая сила, которая действует на заряд e_1 пылинки, направлена вверх и равна $e_1 \frac{U_1}{d}$, где d — расстояние между пластинами *A* и *B*. Обозначим силу тяжести, действующую на пылинку, через P . Условие равновесия пылинки в пространстве между пластинами — равенство силы тяжести и электрической силы:

$$P = e_1 \frac{U_1}{d}.$$

В этом состоянии я освещал пылинку источником света, вызывающим фотоэлектрический эффект. Спустя некоторое время неподвижная прежде пылинка начинала падать. Так как сила тяжести P не могла измениться от освещения, не изменились U_1 и d , то, следовательно, уменьшился заряд e_1 до какой-то величины e_2 .

Увеличивая разность потенциалов U_1 до нового значения U_2 , можно было снова остановить падение пылинки; при этом должно удовлетворяться равенство $e_2 \frac{U_2}{d} = P$.

Заряжая и снова разряжая пылинку, можно было этот процесс повторять сотни раз, каждый раз при соответственных потенциалах U_1, U_2, U_3, \dots . Оказалось, что различные заряды e_1, e_2, e_3, \dots , которые имела пылинка, точно выражались следующим соотношением:

$$e_1 : e_2 : e_3 : \dots = \frac{1}{U_1} : \frac{1}{U_2} : \frac{1}{U_3} : \dots = 1 : 2 : 3 : \dots$$

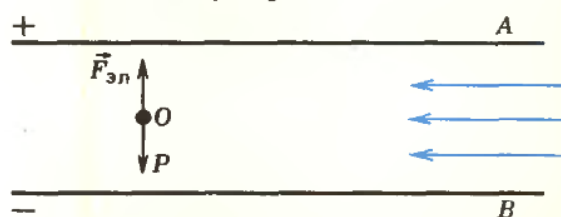


Рис. 1. Схема опыта по определению заряда электрона.

Заряды пылинки изменялись как ряд целых чисел. Когда на пылинке оставался один отрицательный заряд, то она теряла его целиком при освещении и оставалась незаряженной. Действительно, никакой разностью потенциалов U (ни положительной, ни отрицательной) не удавалось замедлить падение частички. Но если во время падения продолжать освещение, то спустя некоторое время пылинка, теряя еще один заряд, заряжалась положительно, и тогда ее снова можно было остановить, но только уже противоположной разностью потенциалов, когда потенциал верхней пластины отрицательный, а нижней — положительный.

Тысячи таких опытов с пылинками из различных материалов показали, что заряд любой пылинки всегда состоит из целого числа вполне определенных порций, равных по наиболее точным современным измерениям $4,8024 \cdot 10^{-10}$ абсолютных электростатических единиц (за единицу принимается заряд, отталкивающий равный ему заряд, помещенный на расстояние в 1 см, с силой в 1 дину)*). Каждый раз, когда при освещении пылинка теряла отрицательный заряд, он оказывался равным — $4,8024 \cdot 10^{-10}$ абс. ед.

Эти единичные отрицательные заряды получили название электронов.

Никогда и нигде не удавалось наблюдать зарядов, меньших заряда электрона или равных нецелому числу зарядов электрона. Такие же отрицательно заряженные частицы — электроны — испускают накаливаемые тела. Это явление называют термоэлектронной эмиссией; им широко пользуются в радиолампах.

При пропускании электрического заряда сквозь сильно разреженные газы из отрицательного полюса (катода) выходит поток отрицательных зарядов, называемый катодными лучами. Удалось показать, что и

катодные лучи — поток тех же электронов.

Поместив катодные лучи или поток фотоэлектронов в магнитное поле, можно определить отношение заряда электронов e к их массе m , а следовательно, и самую массу электронов.

Оказалось, что не только заряды, но и массы m электронов самого различного происхождения в точности совпадают и что

$$m = 9,1060 \cdot 10^{-28} \text{ г.}$$

В течение первого десятилетия нашего века электрон был единственной известной тогда «элементарной» частицей. Физики думали, что электрон — последний и простейший элемент природы, и представляли его себе, как раньше атом, в виде шарика, по объему или по поверхности которого распределен электрический заряд.

Однако и тогда уже, в 1908 г., В. И. Ленин указывал, что принцип диалектического материализма о неисчерпаемом многообразии природы заставляет ожидать, что и электрон — сложное образование.

Это предвидение позже подтвердилось, хотя мы и сейчас не можем быть уверены в полноте существующей картины электрона.

Оказалось, что электрон обладает вращательным моментом (спином) s и магнитным моментом μ .

Магнитный момент электрона определяет максимальный момент сил, действующих на электрон в магнитном поле с индукцией \vec{B} :

$$M_{\text{max}} = |\vec{B}| \mu.$$

Для витка с током I

$$M_{\text{max}} = |\vec{B}| IS,$$

где S — площадь, ограниченная витком (см. «Физика 9»). Поэтому магнитный момент витка с током равен $\mu = IS$. Магнитный момент — величина векторная. Вектор $\vec{\mu}$ направлен перпендикулярно плоскости витка.

Магнитные свойства электрона с полной наглядностью обнаруживаются в опытах, которые были поставлены Штерном и Герлахом по методу молекулярного пучка. В этом методе изучается поток молекул в виде тонкой ленты, выделенной при помощи системы узких щелей в пространстве, в котором создано воз-

*) По измерениям, проведенным к настоящему времени, наименьший электрический заряд (положительный или отрицательный) равен $e = 4,803250(21) \cdot 10^{-10}$ абсолютных электростатических единиц (ед. СГСЭ), или (в СИ) $e = 1,6021892(46) \cdot 10^{-19}$ Кл.

можно высокое разрежение. Всякое отклонение такого потока молекул от прямолинейного пути может быть вызвано только действием сил, а эти силы могут быть вычислены по начальной скорости молекул и величине отклонения. Этот метод применяется для обнаружения самых разнообразных воздействий, в том числе даже таких слабых, как силы тяготения.

Если пропустить молекулярный пучок через сильное и притом резко неоднородное магнитное поле, то отдельные молекулы отклонятся тем сильнее, чем больше их магнитный момент и чем меньше угол между направлением магнитного момента и направлением магнитного поля, через которое проходят молекулы.

Магнитный момент может происходить как от магнитных свойств самого электрона, так и от того электрического тока, который электрон создает, двигаясь по замкнутой орбите. Если, например, электрон движется по окружности радиуса r со скоростью v , то через поперечное сечение окружности электрон проходит $v/2\pi r$ раз в секунду, перенося каждый раз свой заряд e . Таким образом, вращающийся по окружности радиуса r электрон представляет собой ток $i = ev/2\pi r$. Магнитный момент μ движущегося по круговой орбите электрона равен

$$\mu = \pi r^2 i = \frac{evr}{2}.$$

Механический момент количества движения такого вращающегося по орбите электрона — $L = mvr$.

Таким образом, для движущегося по круговой орбите электрона

$$\frac{\mu}{L} = \frac{e}{2m}.$$

В атомах водорода, лития и серебра механический вращательный момент электронов при движении по орбите равен нулю: $L = 0$. Поэтому и магнитный момент μ должен быть равным нулю.

Между тем для потока всех этих атомов получилось хорошо измеримое отклонение при прохождении сквозь магнитное поле (рисунок 2). При этом весь поток разбивался на

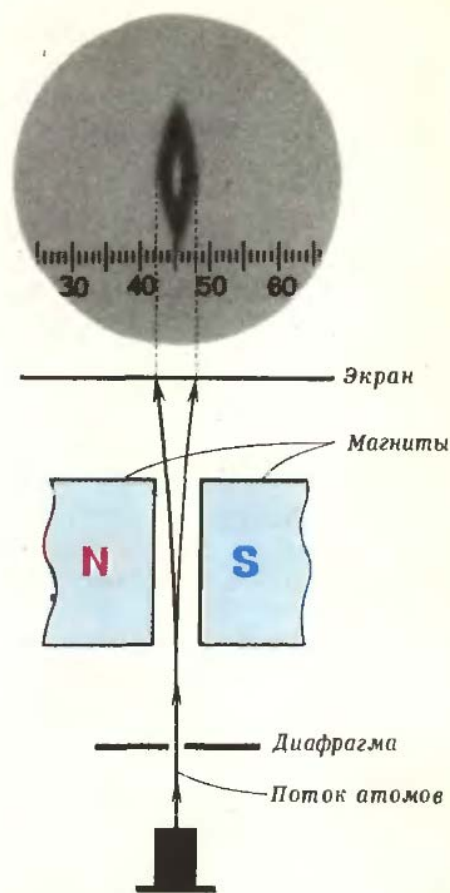


Рис. 2. Схема опыта Штерна и Герлаха.

две части, отклонявшиеся в противоположные стороны на равные углы (фото на рисунке 2). Из результатов этого опыта мы заключаем, что:

1) электроны, независимо от своего движения, обладают определенным магнитным моментом даже при $L = 0$;

2) проходя сквозь магнитное поле, электроны всех атомов ориентируются так, что их магнитные моменты $\vec{\mu}$ направлены либо по направлению магнитного поля (параллельная ориентация), либо в противоположную сторону (антипараллельная ориентация); промежуточные же ориентации полностью отсутствуют.

Оказывается, наряду с магнитными свойствами электрон обладает и определенным моментом вращения s ; однако соотношение между μ и s в этом случае имеет иное значение:

$$\frac{\mu}{s} = \frac{e}{m}$$

— отношение μ/s вдвое больше, чем отношение μ/L .

Существование механического момента, связанного с магнитным, было показано в опытах, идея которых принадлежит Эйнштейну и де Хаасу, но которые в особо наглядной форме были поставлены П. Л. Капицей и мной в 1920 г.

В хорошо откачанной кварцевой трубе на длинной тонкой нити подвешивался намагниченный никелевый стерженек. Магнитное поле Земли было сведено к нулю. Окружая трубу горячей печью или пламенем газовой горелки, можно было быстро нагреть стерженек выше температуры в 360°C , когда никель размагничивается; в этот момент стерженек начинал закручиваться.

Намагничивание никеля вызвано тем, что магнитные моменты атомных электронов поворачиваются в одну сторону. При размагничивании они, наоборот, разбрасываются тепловым движением по всем направлениям.

Так как электронные магнитики в то же время вращаются вокруг своей оси, то намагниченный стерженек обладает скрытым в его электронах вращательным моментом. При размагничивании этот момент исчезает. Но, согласно основным законам механики, вращательный момент системы неизменен, как неизменна и ее энергия.

В нашем случае подвешенный в пустоте стерженек не может передать своего вращательного момента окружающей среде. Вращательный момент электронов намагниченного стерженька при размагничивании перешел в момент количества движения всего стерженька как целого — стерженек начал вращаться.

Первоначальные опыты Эйнштейна и де Хааса, проведенные с железом, дали для отношения μ/L значение, в пределах 20% совпадающее с величиной $e/2m$, относящейся к движению электронов по круговым орбитам. Однако впоследствии, устранив незамеченные прежде ошибки опыта, они установили, что

$$\frac{\mu}{L} = \frac{e}{m},$$

как это должно быть для вращающихся вокруг собственной оси элект-

тронов. Таким образом, опыты Эйнштейна и де Хааса показали, что намагничивание железа объясняется наличием у электронов собственных магнитных моментов, не связанных с движением электронов по орбитам.

Соотношение между μ и s было определено Барнетом другим методом: приводя в быстрое вращение стержни из различных материалов, Барнет ориентировал этим механические моменты (спины) электронов и таким образом превращал стержни в магниты. Эти измерения привели к тому же соотношению μ и s , которое имеет место для спинов электронов.

Все эти спины, в полном согласии с теорией, приводят к следующему результату: магнитный момент $\vec{\mu}$ электрона в магнитном поле устанавливается параллельно или антипараллельно полю, и проекции $\vec{\mu}$ на направление индукции \vec{B} поля равны

$$\mu_B = \pm \frac{1}{2} \frac{e}{m} \frac{h}{2\pi} = \pm \frac{1}{2} \frac{e}{m} h.$$

Знак «+» соответствует параллельной установке, знак «—» соответствует антипараллельной установке.

Этим проекциям магнитного момента соответствуют проекции спина s электрона

$$s_B = \pm \frac{1}{2} \frac{h}{2\pi} = \pm \frac{1}{2} \hbar.$$

В этих формулах h — универсальная постоянная (постоянная Планка), равная $6,624 \cdot 10^{-27}$ эрг \cdot с *).

В полную характеристику электрона входит, наряду с его зарядом e и массой m , и его спин s .

Если система состоит из нескольких электронов, их спины могут устанавливаться только двумя путями: 1) параллельно друг другу, создавая механический и магнитный моменты системы, равные сумме моментов всех электронов; 2) антипараллельно, взаимно компенсируя друг друга, полностью или частично.

*) По современным данным $h = 6,626 \times 10^{-27}$ эрг \cdot с $= 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж \cdot с.