

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

Дробный заряд — новая тенденция в электронике

В.П. Быков

Дается краткий обзор сравнительно недавних теоретических и экспериментальных исследований, свидетельствующих в пользу возможности существования электронных объектов с зарядом, составляющим долю элементарного электронного заряда ($e/2$, $e/3$ и т.д.).

PACS number: 03.65.Ud

Вопрос о существовании электронных объектов с дробным зарядом, т.е. зарядом, равным $e/2$, $e/3$ и т.д., имеет в некоторой степени фундаментальный характер, но пока нельзя сказать, что он полностью разрешен. Поэтому в названии статьи употреблено слово "тенденция" — именно как на тенденцию имеет смысл обратить внимание на это направление исследований.

Обратимся к некоторым фактам, связанным с электронами. Отметим, речь пойдет в целом о вещах, строго говоря, известных.

На рисунке 1 изображено 2р-состояние атома водорода. Если говорить, скажем, о переходе из 2р-состояния в 1s-состояние, то ему отвечает хорошо известная головная линия серии Лаймана в водороде. Эти состояния подробно исследованы, много раз наблюдались и соответственно никого не удивляют. Тем не менее, как видно из рисунка, волновая функция этого состояния разделена на две части. Если подходить формально, то можно говорить, что в верхней части распределения содержится половина заряда электрона, а другая половина — в нижней части распределения.

В литературе волновые функции с несколькими максимумами, относящиеся к одному электрону, широко обсуждаются. Иногда их называют состояниями типа "шрёдингерского кота", хотя на самом деле к первоначальной работе Шрёдингера это имеет малое отношение.

На рисунке 1 приведено также выражение для волновой функции ψ , показаны сечение ψ и квадрат модуля ψ^2 в том же сечении. Можно видеть, что благодаря зависимости от косинуса полярного угла амплитуда волновой функции обращается в нуль при $\vartheta = \pi/2$ и происходит разделение волновой функции на две части.

Если верхнюю половину волновой функции тем или иным способом сдвинуть вверх, скажем, на 1 см, а потом

аналогично сдвинуть вниз нижнюю половину, предоставляя таким образом возможность этим половинам, каждой с зарядом $e/2$, существовать самостоятельно, то это, скорее всего, вызовет возражения.

Почему это может вызвать возражения? Приведем в связи с этим выдержку из известного учебника Д.И. Блохинцева по квантовой механике [1]: "В самом деле, частица *всегда* действует как целое, и обнаруживается в приборе вся частица, а вовсе не ее доля". И далее: "...В том, что простейшие частицы *всегда* действуют, как нечто целое, и заключается атомизм, наблюдаемый в явлениях микромира. Поэтому представление о частицах как об образованиях из волн де Бройля противоречит атомизму и должно быть отвергнуто".

Для примера процитирован отрывок из учебника Д.И. Блохинцева, поскольку в нем основная идея ясно выражена. Собственно говоря, так думает большинство физиков за исключением небольшой группы "диссидентов", к которой, правда, принадлежал Эйнштейн. Пожалуй, Д.И. Блохинцев отличается от других авторов тем, что он все же выразил удивление по этому поводу, другие же мысль излагают как факт, не вызывающий никаких сомнений. (Свое удивление Д.И. Блохинцев выразил не в процитированном учебнике, а в отдельно изданной брошюре *Принципиальные вопросы квантовой механики* [2].)

В приведенном отрывке из книги Блохинцева выделено слово "*всегда*". Всегда ли? Собственно говоря, именно об этом пойдет речь ниже.

Рассмотрим сначала некоторые низкотемпературные эксперименты с жидким гелием. Жидкий гелий не типичный объект для электронных исследований. Но далее речь пойдет о вещах довольно простых.

Жидкий гелий, как известно, переходит в сверхтекучее состояние при температуре около 2 К, теряя при этом вязкость. Менее известно другое его свойство: в сверхтекучем состоянии гелий не терпит никаких примесей — все растворенные в нем примеси при переходе в сверхтекучее состояние сразу осаждаются на стенках сосуда, в котором гелий содержится. Исключением является изотоп He^3 , который в каком-то количестве может содержаться в сверхтекучем гелии. Таким образом, сверхтекучий гелий — это одно из самых чистых веществ на свете. В свое время это обстоятельство привлекло внимание

В.П. Быков. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, ул. Вавилова 38, Российская Федерация
Тел. (495) 135-02-70
E-mail: v.p.bykov@mtu-net.ru

Статья поступила 21 сентября 2005 г.,
после доработки 5 февраля 2006 г.

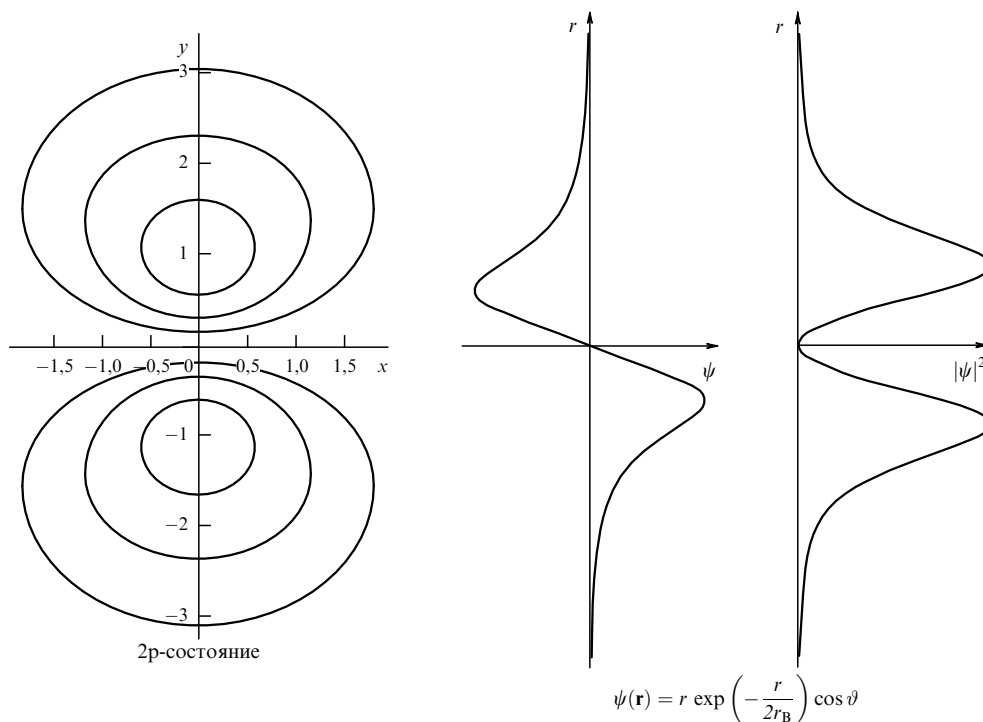


Рис. 1. 2p-состояние атома водорода.

нашего известного ученого Александра Иосифовича Шальникова. (Автору статьи довелось учиться в аспирантуре под руководством А.И. Шальникова. В связи с этим автору приятно его вспомнить и отметить его выдающийся вклад в науку.)

А.И. Шальников задался таким вопросом: жидкий гелий не терпит никаких атомных или молекулярных примесей, а как он себя поведет, если в качестве примеси окажутся электроны? Ввести электроны в жидкий гелий нетрудно: достаточно рядом с жидким гелием поместить радиоактивный источник, и электроны, пройдя через стенки сосуда, окажутся в жидком гелии.

Ответ на этот вопрос оказался довольно простым. Выяснилось, что жидкий гелий, оставаясь верным своим принципам, выделяет каждому электрону маленький пузырек, иными словами, некоторое свободное пространство, в котором электрон и сосредоточивается. Основная же часть жидкого гелия остается чистой.

С физической точки зрения пузырек в гелии для электрона представляет собой потенциальную яму, глубиной примерно в 1 эВ (рис. 2). Нетрудно найти основное, сферически симметричное решение уравнения Шрёдингера для такой ямы:

$$\psi(\mathbf{r}) = A \frac{\sin kr}{r}.$$

В связи с этими заряженными пузырями образовалось целое научное направление. Стали измерять подвижность таких пузырей, для чего всю систему помещали в переменное электрическое поле. Оказалось, что пузыри ведут себя как частицы с довольно большой массой, порядка двухсот масс атома гелия. Удалось определить диаметр пузыря, который оказался равным 38 Å.

Впоследствии в сверхтекучем гелии, содержащем подобные заряженные пузыри, возбуждали ультразвуковое поле, и выяснилось, что у пузырей имеются деформационные резонансы.

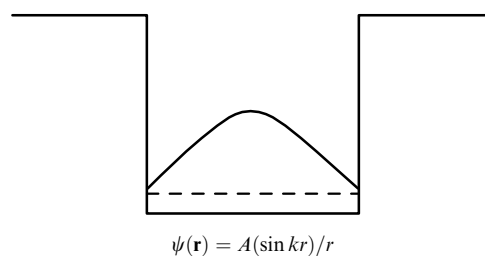


Рис. 2. Пузырь в сверхтекучем гелии как потенциальная яма для электрона; волновая функция электрона.

Последовали также теоретические работы в этом направлении. В целом, теоретические выводы и экспериментальные наблюдения хорошо соответствовали друг другу.

Поскольку пузырек представляет собой потенциальную яму, то в ней должны быть, кроме основного, также и возбужденные состояния, которые оказалось возможным наблюдать с помощью лазерных источников излучения.

Что касается теории, то исследователей в первую очередь интересовали размер и форма пузырей. В идейном отношении теория проста — размер и форма пузырей определяются условием минимальности полной энергии, хотя отыскание этого условия в ряде случаев является весьма трудоемкой задачей.

Энергия пузыря состоит из трех частей — энергии электрона, поверхностной энергии и энергии, связанной с изменением объема пузыря; ее можно записать в виде

$$E = E_{el} + \alpha \int dS + \int dVP,$$

где E_{el} — энергия электрона, которая может быть найдена как решение соответствующего уравнения Шрё-

дингера, α — поверхностное натяжение, P — давление, S — площадь поверхности пузыря, V — его объем. В сферически симметричном случае этот функционал имеет следующий вид:

$$E = \frac{h^2}{8mR^2} + 4\pi R^2\alpha + \frac{4}{3}\pi R^3P,$$

где R — радиус пузыря. В этом случае минимум функционала находится тривиально, и для диаметра сферически симметричного пузыря получается как раз приведенное выше значение 38 Å, определенное из экспериментов.

В общем, вокруг этих заряженных пузырей возникла некоторая наука, основы которой, как сказано выше, были заложены А.И. Шальниковым, и довольно много народу оказалось в нее втянуто, включая известного специалиста в этой области Х. Мариса из Брауновского университета (США). О его работе "Properties of Electron Bubbles in Liquid Helium" [3], опубликованной в солидном издании *Journal of low temperature physics* в 1998 г., следует сказать особо.

Х. Марис задался вопросом о форме пузыря в том случае, когда электронное состояние в пузыре является возбужденным, т.е. состоянием, потерявшим сферическую симметрию. Естественно, что отсутствие сферической симметрии у электронного состояния должно сказаться и на форме пузыря. Первое возбужденное электронное состояние в потенциальной яме, которую представляет собой пузырь, напоминает возбужденное 2р-состояние атома водорода, показанное на рис. 1.

Хотя теоретически проблема остается по-прежнему в минимизации приведенного выше функционала, однако она становится гораздо труднее. Действительно, процесс решения теперь состоит в решении уравнения Шрёдингера сначала при заданной форме потенциальной ямы, затем форма потенциальной ямы (т.е. пузыря) несколько деформируется, после чего выясняется, уменьшается ли полная энергия пузыря или увеличивается. Уменьшение полной энергии пузыря означает, что форма пузыря деформирована в нужном направлении. И так повторяется несколько раз до тех пор, пока полная энергия не стабилизируется на некотором минимальном уровне. Форма пузыря, соответствующая этой энергии, и есть равновесная форма пузыря при выбранном возбужденном состоянии электрона.

Результаты расчетов Х. Мариса показаны на рис. 3. Даны равновесные формы пузырей, соответствующих различным электронным состояниям. В левом верхнем углу рисунка показано основное, сферически симметричное 1s-состояние. Естественно, форма пузыря в этом случае также сферическая. Рядом со сферическим, справа от него изображено 2р-состояние (1р-состояние по терминологии Х. Мариса, так как в его работе используется осевая симметрия, а не сферическая, как обычно в атомном случае), которое фактически очень похоже на водородное 2р-состояние (см. рис. 1). Состоянию соответствует волновая функция, изображенная над ним. Показано также сечение в поперечном направлении. Как можно видеть из рис. 3, волновая функция оказывается немного вытянутой в вертикальном направлении, соответственно пузырь тоже вытягивается в этом направлении. В правом верхнем углу рисунка есть еще более вытянутая волновая функция, отвечающая еще

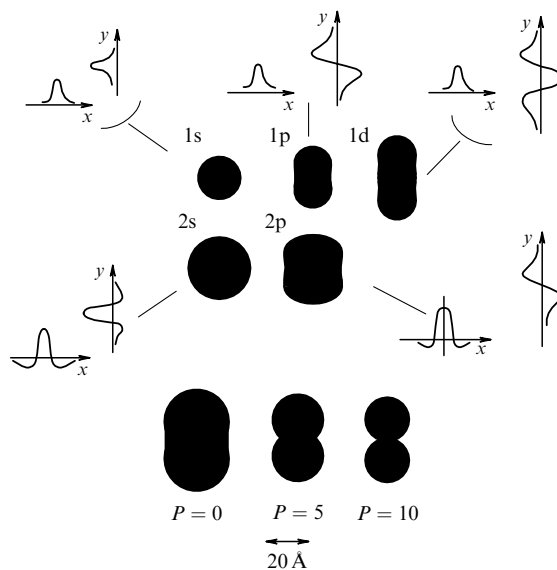


Рис. 3. Формы заряженных пузырей при различных состояниях электрона и различных давлениях P .

более высокому по энергии состоянию — пузырь также сильно вытягивается в том же направлении.

На рисунке 3 также можно видеть другое сферически симметричное состояние — 2s, пузырь в этом случае также сферически симметричен, но его диаметр несколько больше, чем в случае 1s-состояния.

Х. Марис обратил внимание на то, что у пузыря, соответствующего 1р-состоянию электрона, имеется небольшая перетяжка. Она совершенно естественна, поскольку соответствует нулю волновой функции, что и отражается на форме пузыря.

Далее Х. Марис задал себе вопрос, что произойдет если увеличить давление. В расчетах изменить давление довольно просто. Формы пузырей, рассчитанные им, показаны на рис. 3 в нижнем ряду, под ними указаны соответствующие давления.

Форма пузыря в левом нижнем углу рис. 3 в точности такая же, как и у пузыря в середине верхнего ряда, только немного в другом масштабе. Подчеркнем, что эти картинки есть результат очень сложного расчета, поскольку изменяются как форма ямы, так и волновая функция и эти изменения взаимно связаны. Несмотря на простоту функционала расчет довольно сложный.

Как видим, при увеличении давления до 5 атм глубина перетяжки увеличилась, при давлении 10 атм она стала еще больше, а при еще большем давлении пузырь просто распался на два отдельных пузыря меньшего размера. Подчеркнем, что заряд каждого маленького пузыря составляет $e/2$, т.е. половину элементарного заряда электрона.

Фактически Х. Марис реализовал (теоретически, конечно, модельно) ту ситуацию, о которой говорилось выше, когда обсуждалась гипотетическая возможность разделить 2р-состояние атома водорода на две части так, чтобы каждая из частей имела заряд $e/2$. После образования маленькие пузыри расходятся в жидкости и существуют далее независимо друг от друга. Следует подчеркнуть, что эта картина получается в результате квантово-механического расчета и квантовой механике ни в коей степени не противоречит.

Можно всю эту картину списать на то, что это все теория, а как обстоят дела фактически может показать только эксперимент. Х. Марис предполагает провести соответствующие эксперименты, однако пока сведений о таких экспериментах нет. Тем не менее мы все же живем в такой век, когда уже никаких сомнений относительно справедливости квантовой механики не осталось. Фактически, как квантовая механика предсказывает, так и бывает. Что касается работы Х. Мариса [3], то она сделана очень аккуратно и полностью в рамках обычной квантовой механики. Поэтому все это представляется довольно серьезным и, как говорится, есть над чем подумать. Фактически распад пузыря на две части показывает, что волновая функция описывает реально существующую волну, в противоречие утверждению из учебника Д.И. Блохинцева, процитированному выше.

Теперь обратимся к работам из другой области, хотя также из области низких температур. Речь пойдет о двумерных электронных системах. Соответствующие исследования опубликованы в трех работах, за которые в 1998 г. была присуждена Нобелевская премия. Это работы по так называемому дробному эффекту Холла. Одна статья экспериментальная, принадлежащая Тсуи, Стормеру и Госсарду [4], и две теоретические, принадлежащие Лафлину [5].

Образец, который использовался в экспериментах, устроен сложно. Он состоит из нескольких тонких слоев с различным составом (рис. 4). Некоторое количество электронов собирается на границе между двумя слоями, образуя двумерный электронный газ, поскольку здесь для электронов существует потенциальная яма. Иными словами, электроны не могут двигаться в направлении, перпендикулярном слоям. Тогда как в направлении вдоль слоя электроны совершенно свободны.

Однако перпендикулярно к этим слоям прикладывается сильное магнитное поле. Из рисунка 5 видно, что поле изменяется вплоть до 200 кГс, т.е. до значительных величин. При измерениях через образец пропускается электрический ток; из-за большого поперечного магнитного поля, приложенного к образцу, возникает эффект Холла, т.е. поперечная разность потенциалов.

В слое, где находятся электроны, образующие двумерный электронный газ, при относительно слабых магнитных полях происходит обычный эффект Холла, т.е. отклонение электронов от прямолинейной траектории и возникновение холловского "поперечного" напряжения, которое растет пропорционально магнитному полю. Результаты измерений эффекта Холла приведены на рис. 5. В верхней части рисунка показан образец и зависимость эффекта Холла от магнитного поля, в нижней — сопротивление образца в тех же условиях.

В двумерном электронном газе при достаточно большом поперечном магнитном поле имеют место состояния Ландау. Эти состояния обладают определен-

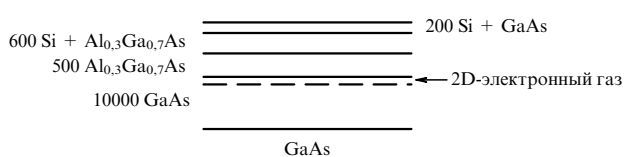


Рис. 4. Многослойный образец для исследования двумерного электронного газа.

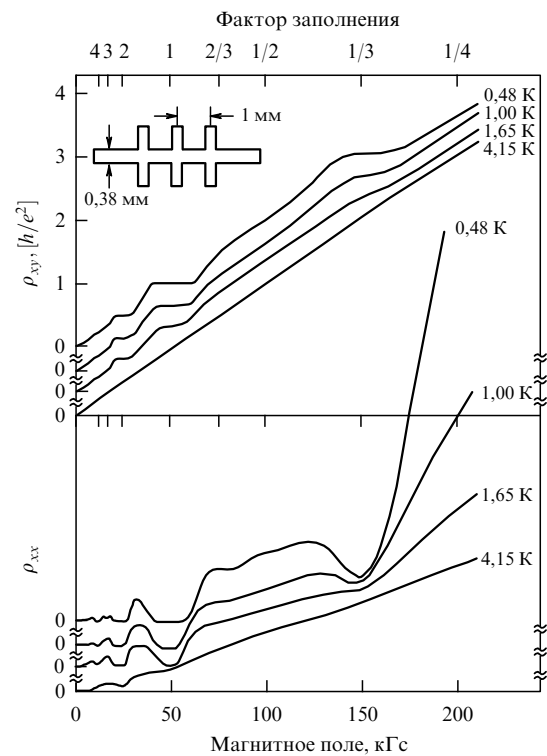


Рис. 5. Результаты измерений согласно [4].

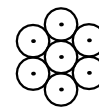


Рис. 6. Упорядочивание согласно Клитцингу.

ным размером, и можно посчитать, сколько состояний Ландау укладывается на заданной площади. Когда число электронов совпадает с числом состояний Ландау, в образце происходит электронная конденсация (или кристаллизация) (рис. 6). То есть в слое образуется своего рода электронное твердое тело, которое сдвинуть в поперечном направлении магнитным полем трудно, из-за чего на зависимости холловского напряжения от магнитного поля появляется плато (см. рис. 5). Впервые такое плато на зависимости холловского напряжения от магнитного поля было обнаружено Клитцингом, за что в 1985 г. ему была присуждена Нобелевская премия. На рисунке 5 это левое нижнее плато.

Фактически Клитцинг получил Нобелевскую премию за открытие отмеченной выше электронной конденсации, иными словами, за открытие электронного кристалла (см. рис. 6). В экспериментах Тсуи, Стормера и Годдарда такая, клитцинговская конденсация происходит при поле 50 кГс.

Что произойдет дальше, если увеличить магнитное поле? При увеличении магнитного поля состояния Ландау уменьшаются по размеру и между ними появляется свободное пространство (рис. 7). Из-за теплового движения эта структура разрушается, и снова проявляется обычный эффект Холла. Однако при втрое большем

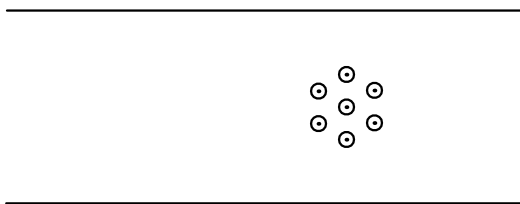


Рис. 7. Упорядочивание согласно Тсуи, Стормеру и Госсарду.

магнитном поле между этими состояниями может поместиться еще одно состояние Ландау.

Легко понять, что полное число состояний в этом случае утраивается и оказывается, что снова возникает возможность образования электронного кристалла, иными словами, жесткого электронного твердого тела¹. Поскольку число электронов осталось прежним, а число состояний утроилось, то теперь уже каждое состояние заполнено лишь на одну треть. Заряд каждого такого маленького состояния Ландау составляет одну треть элементарного электронного заряда. Соответственно при втрое большем магнитном поле на зависимости холловского напряжения от магнитного поля снова появляется плато. Именно такое плато было обнаружено в экспериментах Тсуи, Стормера и Госсарда.

Так в физике впервые появилось представление о дробном заряде (если не учитывать кварки, не имеющие к данному вопросу никакого отношения). Более того, как уже отмечалось, за эти работы была присуждена Нобелевская премия 1998 года. К результатам, представленным на рис. 5, стоит отнестись с уважением — за них были получены две Нобелевские премии.

В литературе вопрос о подобных образованиях с зарядом $e/3$ обсуждался, т.е. он вызвал некоторое удивление в теоретических кругах. В целом, явление сочли коллективным эффектом и, значит, фактически отнесли к проявлению квазичастиц. Заряд же квазичастицы может и не совпадать с элементарным зарядом.

Позже, однако, появилась исследовательская группа из Израиля, которая с таким подходом, по-видимому, не согласилась и пошла дальше. Две работы этой группы опубликованы в журнале *Nature*: Р. де-Пикиотто, М. Резников, М. Хайблум, В. Уманский, Г. Бунин, Д. Махалу "Прямое наблюдение дробного заряда" (1997) [6] и М. Резников, Р. де-Пикиотто, Т.Г. Гриффитс, М. Хайблум, В. Уманский "Наблюдение квазичастиц с зарядом одна пятая электронного" (1999) [7] (курсив мой. — В.Б.).

Исследуемый ими образец имел конфигурацию, схожую с конфигурацией образцов, используемых в предшествовавших опытах. Но авторы работ [6, 7] не стали исследовать эффект Холла, поскольку они уже знали про образование электронного кристалла. Зато они создали устройство, названное ими "квантовыми воротами" (рис. 8), состоящее из электродов, наложенных сверху на образец, на которые можно подавать отрицательный потенциал. Образовавшийся электронный кристалл (или формы с упомянутым выше ближним порядком) не может пройти через эти ворота, не разрушившись.

¹ В работе Лафлина утверждается, что при этих условиях в двумерной электронной системе образуется "электронная жидкость", т.е. не вся система охватывается одним кристаллом, но в ней образуется лишь "ближний порядок", характерный для обычных жидкостей.

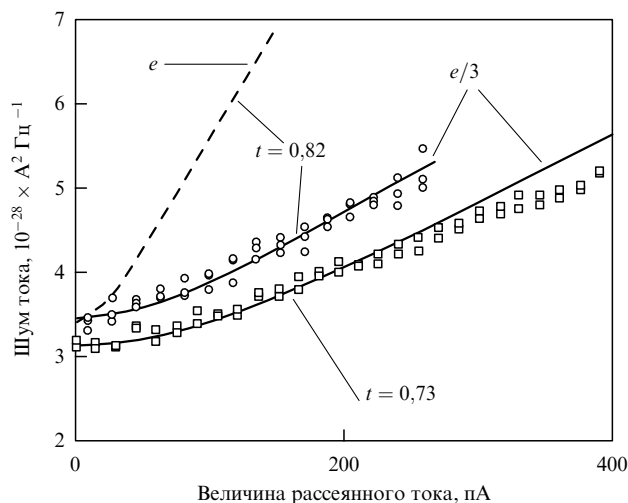
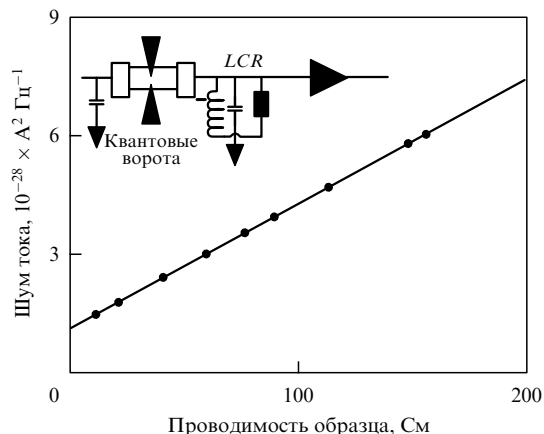


Рис. 8. Зависимости величины шумов от тока, проходящего сквозь квантовые ворота. (Из работы [6].)

Поэтому на квантовых воротах электронный кристалл разрушается, и дальше электронная плазма идет просто как обычный хаотичный ток.

Шумы обычных токов измерялись давно, и давно известно, что они пропорциональны, во-первых, самому току, а во-вторых, заряду элементарного носителя тока, благодаря чему измерение шумов тока стало одним из стандартных способов определения элементарного носителя тока. В обычных металлах таким носителем является элементарный электронный заряд e .

Израильские исследователи, измерив эти шумы, показали, что в данном случае элементарным носителем тока является заряд $e/3$. Это можно видеть из зависимости, приведенной на рис. 8. Экспериментальные точки ложатся на кривую, соответствующую заряду $e/3$, зависимость же, соответствующая заряду e , лежит выше. Эти графики являются функциями параметра t — прозрачности квантовых ворот, который определяется приложенным к ним потенциалом. Авторы работы [6] называют это прямым наблюдением дробного заряда. Слова "прямое наблюдение" следует понимать, конечно, лишь по отношению к предыдущим опытам, в которых дробность заряда была "замаскирована" коллективностью эффекта. А в их опыте дробность заряда уже проявляется. Практически та же группа показала, что при немного других условиях могут возникнуть также элементарные носители тока с зарядом $e/5$.

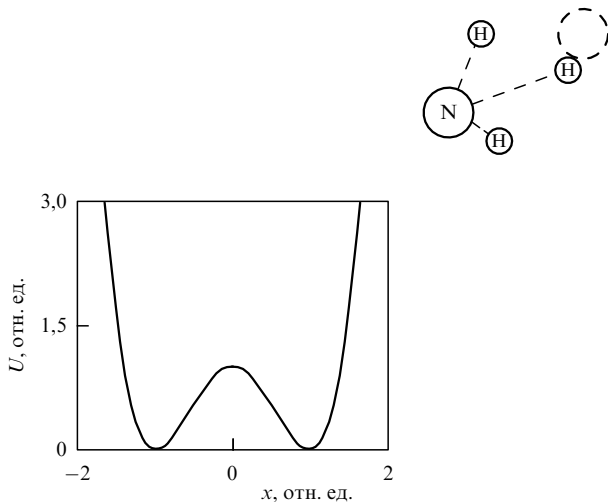


Рис. 9. Потенциал с двумя минимумами и молекула аммиака.

Таким образом, имеются как теоретические, так и экспериментальные указания на существование образований с дробным зарядом.

Еще раз напомним, что объектов с волновыми функциями, разделенными на части, в физике довольно много, в частности, таким объектом является молекула аммиака. Известно, что потенциал иона азота имеет два минимума (рис. 9). Такой потенциал иногда называют "шляпой Лифшица". Два минимума потенциала означают, что ион азота может находиться как с одной, так и с другой стороны от плоскости, образованной атомами водорода (рис. 9).

Как известно, в этой ситуации наблюдается так называемый инверсионный спектр, т.е. в молекуле аммиака имеются симметричное и антисимметричное состояния иона азота. Стоит напомнить, что работа первого прибора квантовой электроники, так называемого аммиачного лазера, основана как раз на переходе между этими симметричным и антисимметричным состояниями. Это еще раз подтверждает то, что, строго говоря, такие эффекты в принципе известны.

Что, собственно говоря, делал Х. Марис, если к нему вернуться ненадолго. Он рассматривал довольно простую систему — две потенциальные ямы, разделенные некоторым пространством. Как и в молекуле аммиака здесь тоже возможны симметричное и антисимметричное состояния. Все это полностью укладывается в рамки обычной квантовой механики.

Можно ли найти что-нибудь попроще, чем то, что рассматривал Х. Марис? Проще — это молекулярный ион H_2^+ , который много раз исследовался. Известно, что с теоретической точки зрения H_2^+ представляет собой сравнительно простую систему: например, в шрёдингеровском уравнении для электрона в поле двух разнесенных протонов переменные разделяются. Можно сказать, что в молекулярной спектроскопии ион H_2^+ благодаря своей простоте играет ту же роль, что и атом водорода в атомной спектроскопии.

Ион H_2^+ также представляет собой систему с двумя потенциальными ямами — этими ямами являются кулоновское поле около одного протона и кулоновское поле около другого.

Такая система — два протона и один электрон — исследована нами в статье V.P. Vykov, E. Nahvifard "Light

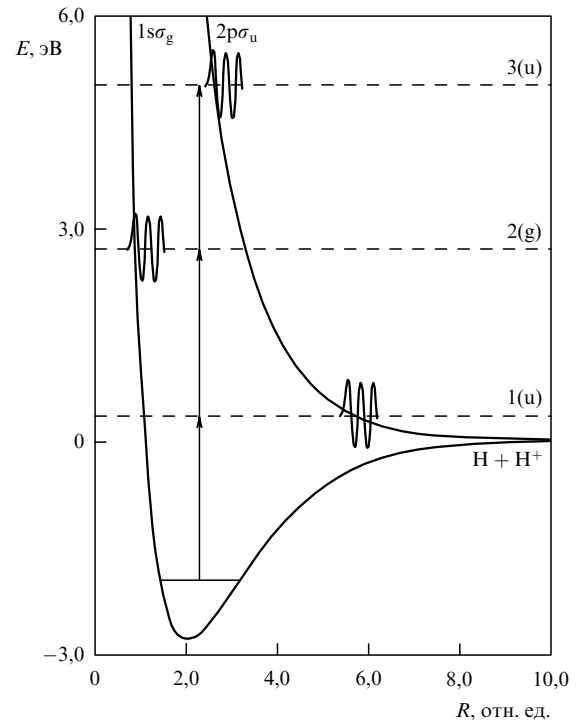


Рис. 10. Зависимость термов молекулярного иона водорода от расстояния между протонами.

scattering by the products of H_2^+ molecular ion dissociation" [8]. В этой публикации нами рассмотрено рассеяние света продуктами диссоциации иона H_2^+ . Исходной позицией являлась известная картинка (рис. 10), которая показывает, в частности, как, по мнению некоторых теоретиков, происходит диссоциация такой молекулы. Эта картина заимствована нами из небольшого обзора французских авторов А. Giusti-Suzor et al. [9].

Можно видеть терм, имеющий минимум и соответствующий симметричному электронному состоянию. Вблизи минимума терма находятся колебательные уровни. Выше по энергии расположен отталкивательный терм, соответствующий антисимметричному электронному состоянию.

Перевести ион с нижнего терма на верхний с помощью одного кванта пока нельзя, так как лазеров с такими квантами не существует. Однако это можно сделать посредством трехквантового процесса, который изображен на этой схеме.

Отталкивательным терм называется потому, что если ион H_2^+ находится на нем, то фрагменты иона разлетаются, т.е. происходит диссоциация. Эта картина, собственно говоря, всем хорошо знакома, так как приводится во многих учебниках по квантовой механике.

Стоит, однако, обратить внимание на одно существенное обстоятельство. В левой верхней части рис. 10, около отталкивательного терма стоит символическое выражение $2p\sigma_u$, где $2p$ означает, что при сближении протонов соответствующее состояние переходит в водородоподобное состояние $2p$, а символ σ_u означает, что электронное состояние иона на этом терме является антисимметричным.

Как уже отмечалось, фрагменты иона разлетаются, и время разлета, скажем, на расстояние 1 мкм составляет примерно 10^{-12} с, т.е. фрагменты разлетаются довольно

быстро. Хотя с житейской точки зрения время разлета мало, на самом деле по отношению к электронным состояниям разлет является адиабатическим, т.е. фактически медленным, процессом. При адиабатическом процессе симметрия электронного состояния не может измениться, т.е. состояние как было антисимметричным в начале разлета, так и должно остаться антисимметричным в его конце. Однако около кривых, в нижней правой части рис. 10 отмечено: $H + H^+$, т.е. нейтральный атом водорода и свободный протон. Иными словами, состояние совсем не симметричное, чего не может быть при адиабатическом разлете.

Что все это означает с точки зрения теории процесса диссоциации иона H_2^+ , мы рассматривать не будем. Оставим это авторам цитируемой статьи [9].

Фактически, все сказанное приводит к главному вопросу. В системе из двух протонов и одного электрона при больших расстояниях между протонами возможны разные электронные состояния: стационарные (симметричные и антисимметричные) (рис. 11), а также нестационарные (несимметричные) (рис. 12), когда вся волновая функция сосредоточена на одном из протонов. И те, и другие состояния ни в коей мере не противоречат квантовой механике.

Стоит отметить, что переход между этими состояниями, поскольку мы имеем дело, скажем, с расстоянием между протонами порядка 1 мкм, занимает примерно 10^{4000} лет, что намного порядков больше времени жизни Вселенной. Иными словами, такой переход фактически невозможен.

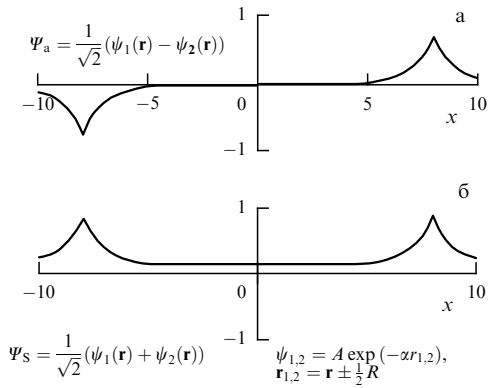


Рис. 11. Симметричное и антисимметричное стационарные электронные состояния при больших расстояниях между протонами.

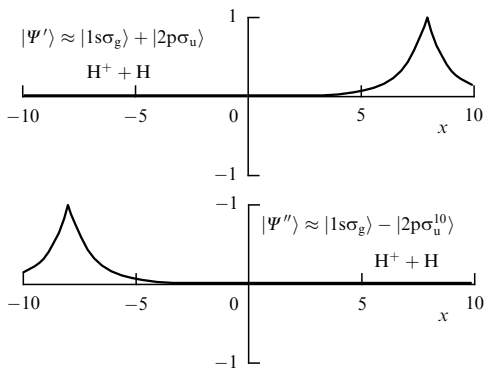


Рис. 12. Нестационарные, несимметричные электронные состояния при больших расстояниях между протонами.

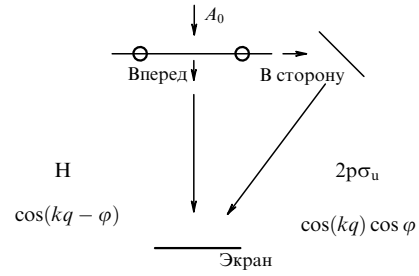


Рис. 13. Схема корреляционного эксперимента по рассеянию света.

Возникает вопрос: можно ли с помощью какого-либо физического эксперимента различить указанные состояния? Это и есть, собственно говоря, *главный* вопрос. В статье [9], цитированной выше, молчаливо предполагалось, что эти состояния неразличимы.

Для решения этого вопроса нами было рассмотрено рассеяние света на продуктах диссоциации иона H_2^+ . Подробности расчетов можно найти в нашей статье [8]. Краткий же вывод из нее такой. В некоторых простых экспериментах (например в экспериментах по рассеянию лазерного излучения) не удастся различить эти состояния. Однако возможны более тонкие, корреляционные опыты (рис. 13), в которых наблюдается интерференция излучений, рассеянных прямо вперед и в сторону. В таких опытах различить состояния, показанные на рис. 11 и 12, *можно!* На рисунке 13 приведены корреляционные функции, соответствующие состояниям, изображенным на рис. 11 и 12, — они разные. Напомним, что каждый фрагмент системы, показанной на рис. 11, несет заряд $e/2$. Следовательно, существование таких объектов возможно и поддается наблюдению.

Представляется интересным исследовать ситуацию, когда в тех же условиях имеет место интерференция интенсивностей, осуществить наблюдение которой, возможно, будет, с экспериментальной точки зрения, проще. Может быть, удастся сделать соответствующую оценку позже.

Что может дать для практики научное направление, связанное с дробными зарядами? Прежде всего хотелось бы отметить, что освоение области дробных зарядов может оказать влияние на электронику в целом, поскольку вся современная электроника основана на целочисленном заряде. Если говорить более конкретно, то освоение области дробных зарядов проявится в снижении шумов электронных устройств, что эквивалентно увеличению чувствительности многих приборов. Фактически это уже проявилось — на рис. 8 видно снижение шумов тока.

Следует отметить, что целочисленный заряд e , рассматриваемый в качестве константы взаимодействия электронного поля с электромагнитным полем, остается совершенно неизменным. Соответствующие расчеты (в рамках, скажем, квантовой электродинамики) не меняются из-за наблюдения дробных зарядов. Заряд некоторого образования — это одно, а константа взаимодействия полей — это совсем другое.

Как уже отмечалось вначале, нельзя сказать, что вопрос о дробных зарядах окончательно прояснен. Необходимы дальнейшие исследования, главным образом новые эксперименты. Наличие указаний на дробность зарядов, возможно, позволит создавать более чувствительные и менее шумящие приборы.

Обсуждаемая выше проблема дробных зарядов генетически связана с известной старой дискуссией Бор–Эйнштейн. Однако, на наш взгляд, более интересными являются возможности повышения чувствительности приборов и снижения их шумов, которые в связи с изложенными идеями открываются перед электроникой.

Список литературы

1. Блохинцев Д И *Основы квантовой механики* (М.: Наука, 1976)
2. Блохинцев Д И *Квантовая механика* (М.: Атомиздат, 1981)
3. Maris H J *J. Low Temp. Phys.* **120** 173 (1998)
4. Tsui D C, Stormer H L, Gossard A C *Phys. Rev. Lett.* **48** 1559 (1982)
5. Laughlin R B *Phys. Rev. B* **27** 3383 (1983); *Phys. Rev. Lett.* **50** 1395 (1983)
6. de-Picciotto R et al. *Nature* **389** (1997)
7. Reznikov M et al. *Nature* **399** 238 (1999)
8. Bykov V P, Nahvifard E *Laser Phys.* **13** 501 (2003)
9. Giusti-Suzor A et al. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **28** 309 (1995)

Fractional charge: a new trend in electronics

V.P. Bykov

*A.M. Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences,
ul. Vavilova 38, 119991 Moscow, Russian Federation*

Tel. (7-495) 135-02 70

E-mail: v.p.bykov@mtu-net.ru

Current theoretical and experimental evidence for the existence of electronic objects with a fraction of an electron charge ($e/2$, $e/3$, etc.) is briefly reviewed.

PACS number: 03.65.Ud

Bibliography — 9 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **176** (9) 1007–1014 (2006)

Received 21 September 2005, revised 5 February 2006

Physics – Uspekhi **49** (9) (2006)
