

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 1998

**Открытие нового вида квантовой жидкости
с дробно заряженными возбуждениями**

PACS numbers: 67.90.+z, 73.40.Hm

Шведская Королевская академия наук присудила Нобелевскую премию 1998 г. по физике совместно проф. Роберту Б. Лафлину (Robert B. Laughlin), Станфордский университет, Калифорния, США, проф. Хорсту Л. Штёрмеру (Horst L. Störmer), Колумбийский университет, Нью-Йорк, и Белл лабораториз при Люсент технолоджиз, Нью Джерси, США, и проф. Дэниэлу Ч. Цуи (Daniel C. Tsui), Принстонский университет, Принстон, Нью-Джерси, США.

Эти ученые получили Нобелевскую премию за открытие того, что в сильных магнитных полях взаимодействующие электроны могут образовывать новые типы "частиц" с зарядами, равными дробным долям заряда электрона. Дословно: *за открытие нового вида квантовой жидкости с дробно заряженными возбуждениями.*



Роберт Б. Лафлин родился в 1950 г. в Висейлии, Калифорния. Гражданин США. Докторская степень по физике присвоена в 1989 г. в Массачусетском технологическом институте, Кембридж, США. Профессор физики при Станфордском университете с 1989 г. За исследования по дробному квантовому эффекту Холла Лафлин получил, помимо других наград, Премию Оливера Э. Бакли от Американского физического общества в 1986 г. и Медаль Института Франклина в 1998 г.

Хорст Л. Штёрмер родился в 1949 г. во Франкфурте-на-Майне. Докторская степень по физике присвоена в 1977 г. в Штутгартском университете, Германия. В 1992–1997 гг. — директор Лаборатории физических исследований в Белл лабораториз. С 1998 г. профессор Колумбийского университета в Нью-Йорке и помощник директора по вопросам физических исследований в Белл лабораториз при Люсент технолоджиз. За исследования по дробному квантовому эффекту Холла Штёрмер получил, помимо других наград, Премию Оливера Э. Бакли от Американского физического общества в 1984 г. и Медаль Института Франклина в 1998 г.



Дэниэл Ч. Цуи родился в 1939 г. в Китае, в провинции Хэнань. Гражданин США. Докторская степень по физике присвоена в 1967 г. в Чикагском университете, США. Профессор Принстонского университета с 1982 г. За исследования по дробному квантовому эффекту Холла Цуи получил, помимо других наград, Премию Оливера Э. Бакли от Американского физического общества в 1984 г. и Медаль Института Франклина в 1998 г.

Электроны в новом обличьи

Хорст Л. Штёрмер и Дэниэл Ч. Цуи сделали свое открытие в 1982 г. в экспериментах со сверхсильными магнитными полями при низких температурах. Не прошло и года после открытия, как Роберту Б. Лафлину удалось объяснить полученные результаты. Он теоретически показал, что электроны в сильном магнитном поле могут сконденсироваться таким образом, чтобы образовать некую *квантовую жидкость*, похожую на квантовые жидкости, возникающие при сверхпроводимости и в жидком гелии. Эти жидкости представляют особый интерес для исследователей потому, что явления, происходящие в капле квантовой жидкости, могут дать более глубокое понимание внутренней структуры и динамики материи. Поэтому работы этих трех лауреатов представляют собой *еще один шаг вперед в нашем понимании квантовой физики* и стимулируют развитие новых теоретических концепций, важных для многих направлений современной физики.

Квантовые эффекты становятся видимыми

В 1879 г. молодой студент Эдвин Х. Холл открыл неожиданное явление. Он обнаружил, что если тонкую золотую пластинку поместить в магнитное поле B , перпендикулярное к ее поверхности, то при протекании вдоль пластинки тока I (под действием обычного омического напряжения V) возникает холловская разность потенциалов V_H и холловское сопротивление R_H в направлении, перпендикулярном как току, так и магнитному полю (см. рис. 5 в нобелевской лекции Х. Штёрмера). Это явление, названное *эффектом Холла*, происходит из-за того, что на движущиеся в магнитном поле электрически заряженные частицы (темные кружки на рисунке, в данном случае электроны) действует сила, отклоняющая их вбок. С помощью эффекта Холла можно определять плотность носителей заряда (отрицательных электронов или положительных дырок) в проводниках и полупроводниках, поэтому он стал стандартным способом измерения в физических лабораториях по всему миру.

Холл проводил свои эксперименты при комнатной температуре и в умеренных магнитных полях менее 1 Тесла (Тл). В конце 1970-х годов исследователи работали при *сверхнизких температурах* (всего несколько градусов выше абсолютного нуля, т.е. около -272°C) и *сверхсильных магнитных полях* (максимум около 30 Тл). Они изучали эффект Холла в полупроводниковых структурах, которые используются в электронной промышленности для изготовления малощумящих транзисторов. В таких материалах электроны удерживаются около некоторой внутренней поверхности, отделяющей разные части материала, но вдоль этой поверхности очень подвижны (см. рис. 1 в лекции Х. Штёрмера).

В таком слое при низких температурах электроны движутся практически, как по плоской поверхности, т.е. только в двух измерениях. Это геометрическое ограничение приводит ко многим неожиданным эффектам. В частности, изменяется картина эффекта Холла. Это проще всего увидеть, если измерять зависимость холловского сопротивления от величины приложенного магнитного поля.

В 1980 г. немецкий физик Клаус фон Клитцинг обнаружил в подобном эксперименте, что холловское сопротивление R_H меняется в зависимости от магнит-

ного поля B не линейно, а ступенчатым образом (см. рис. 2 в нобелевской лекции Д. Цуи). Высота ступенек соответствует значениям сопротивления, которые не зависят от свойств материала и определяются только комбинацией фундаментальных констант ($h/e^2 \approx 25$ килоом), деленной на целое число i . Поэтому говорят, что *сопротивление квантуется*. При квантованных значениях холловского сопротивления обычное омическое сопротивление (на рисунке — нижняя кривая с пиками) обращается в нуль, и система становится в некотором смысле сверхпроводящей. Благодаря этому *целочисленному квантовому эффекту Холла* возник новый международный эталон сопротивления. В 1990 г. для него введена единица 1 Клитцинг, определяемая как холловское сопротивление на четвертой ступеньке, $h/(4e^2)$.

За открытие целочисленного квантового эффекта Холла фон Клитцинг получил Нобелевскую премию по физике за 1985 г. Этот эффект можно понять, если учесть законы квантовой физики для отдельных электронов в сильных магнитных полях. Грубо говоря, электроны движутся только вдоль определенных круговых траекторий, размеры которых определяются магнитным полем. Оказывается, что разные ступеньки показывают, сколько из самых маленьких кружков полностью заполнены электронами.

В своих улучшенных экспериментах по квантовому эффекту Холла, которые, кроме всего прочего, проводились при более низких температурах и в более сильных магнитных полях, Штёрмер, Цуи и их сотрудники обнаружили, к своему большому удивлению, новую ступеньку в холловском сопротивлении, которая была в три раза выше, чем самая высокая из ступенек в работе фон Клитцинга.

Затем они нашли еще целый ряд новых ступенек как над, так и между целочисленными значениями. Сопротивление на этих новых ступеньках можно выразить через ту же константу, что и раньше, но деленную теперь на разные дроби. По этой причине новое явление было названо *дробным квантовым эффектом Холла*. Оно представляло настоящую загадку для исследователей, которые не могли объяснить, откуда взялись новые ступеньки.

Квантовая жидкость нового типа

Спустя год после открытия дробного квантового эффекта Холла, Лафлин предложил его теоретическое объяснение. Согласно теории Лафлина низкая температура и сильное магнитное поле заставляют электронный газ конденсироваться в *квантовую жидкость* нового типа. Поскольку электроны сами по себе не могут конденсироваться (они фермионы), они сначала, в некотором смысле, связываются с "квантами потока" магнитного поля. В частности, для первых ступенек, обнаруженных Штёрмером и Цуи, каждый электрон захватывает три кванта потока, образуя при этом что-то вроде композитных (составных) частиц, которым уже ничто не препятствует конденсироваться (они становятся бозонами).

Раньше квантовые жидкости находили при очень низких температурах только в *жидком гелии* (Нобелевские премии: Ландау, 1962 г.; Капица, 1978 г.; Ли, Ошеров и Ричардсон, 1996 г.) и в *сверхпроводниках* (Нобелевские премии: Каммерлинг-Оннес, 1913 г.; Бардин, Купер и

Шриффер, 1972 г.; Беднорц и Мюллер, 1987 г.). Квантовые жидкости имеют некоторые общие свойства, например, *сверхтекучесть*, но существуют и важные различия в их поведении. Некоторые из них, например, лафлиновская жидкость, состоят из композитных частиц.

Кроме своей сверхтекучести, которая объясняет исчезновение омического сопротивления на ступеньках в эффекте Холла, новая квантовая жидкость, описанная Лафлином, имеет много необычных свойств. Одно из наиболее замечательных свойств состоит в том, что при добавлении одного электрона жидкость изменяется (*возбуждается*) и рождается несколько дробно заряженных "квазичастиц". Эти квазичастицы не являются частицами в обычном смысле слова, а возникают в результате совместного движения электронов в квантовой жидкости. Именно Лафлин впервые показал, что квазичастицы имеют в точности тот дробный заряд, который нужен для объяснения результатов Штёрмера и Цуи. При последующих измерениях обнаруживались все новые и новые дробные ступеньки в эффекте Холла (см. рис. 17 в лекции Х. Штёрмера), но оказалось, что лафлиновская квантовая жидкость может объяснить все экспериментально наблюдаемые ступеньки. На рисунке штриховой диагональной линией показано классическое холловское сопротивление, а сплошная ступенчатая кривая представляет экспериментальные результаты. Стрелками показаны магнитные поля, при которых возникают ступеньки. Особое внимание следует обратить на плато ($1/3$) при максимальном значении магнитного поля, впервые обнаруженное Штёрмером и Цуи, а также на ступеньки, ранее открытые фон Клитцингом (целые числа) в более слабых полях.

Новая квантовая жидкость сильно сопротивляется сжатию; про нее говорят, что она несжимаема. Это происходит из-за того, что при сжатии она образует больше квазичастиц, на что нужно затратить энергию.

Непосредственное наблюдение квазичастиц

Открытие и объяснение дробного квантового эффекта Холла в 1982–1983 годах является, можно сказать,

косвенным свидетельством существования новой квантовой жидкости и дробно заряженных квазичастиц. Недавно нескольким исследовательским группам удалось наблюдать эти новые частицы *непосредственно* (см. список литературы для дополнительного чтения). Это имело место, например, в экспериментах по регистрации очень малых изменений тока, рассматриваемых как результат прохождения в цепи отдельных квазичастиц. Такие эксперименты подобны тому, как если бы мы прислушались к ударам по крыше отдельных градин во время града и по звуку определили бы, что их размер в несколько раз меньше, чем обычно. Эти измерения оказались возможными благодаря удивительному прогрессу микроэлектроники, достигнутому с тех пор, как три нынешних лауреата выполнили свои пионерские работы. Современные эксперименты можно считать *окончательным подтверждением открытий*, удостоенных Нобелевской премии 1998 г.

Перевел с англ. С.М. Апенко

Для дополнительного чтения

Additional background material on the Nobel Prize in Physics 1998 (The Royal Swedish Academy of Sciences). Веб-сайт <http://www.kwa.se>
 Daviss B "Splitting the electron" *New Scientist* (31 January) 36 (1998)
 Collins G P "Fractionally charged quasiparticles signal their presence with noise" *Phys. Today* **50** (11) (1997)
 Anderson P W "When the electron falls apart" *Phys. Today* **50** (10) 42 (1997)
 Kivelson S, Lee D H, Zhang S C "Electrons in flatland" *Scientific Am.* (March) 64 (1996)
 Störmer H, Tsui D "Composite fermions: new particles in the fractional quantum Hall effect", *Physics News* in 1994 American Institute of Physics 1995, p. 33
 Eisenstein J P, Störmer H L "The fractional quantum Hall effect" *Science* 22 June 1990, p. 1510. Рисунок на обложке этого выпуска *Science* имеется также на веб-сайте <http://www.bell-labs.com/new/gallery/fghe.html>

Информация Нобелевского комитета