

ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ 2016 ГОДА

По физике — Д.Таулесс, Д.Холдейн, М.Костерлиц

В этом году Нобелевская премия по физике присуждена трем ученым, родившимся в Великобритании, но давно работающим в США: Дэвиду Таулессу, Дункану Холдейну и Майклу Костерлицу — за «теоретические открытия топологических фазовых переходов и топологических фаз материи».

Дэвид Таулесс (David J.Thouless) родился в шотландском городе Бирсдене, пригороде Глазго, 21 сентября 1934 г. Выпускник Кембриджского университета, он защитил диссертацию по физике в Корнельском университете (Итака, США) под руководством Х.Бете (1958), затем занял позицию постдока в Калифорнийском университете (Беркли, США), в 1965 г. стал профессором Бирмингемского университета на родине, в 1979 г. — Йельского университета (Нью-Хейвен, США), а с 1980 г. работает в Университете штата Вашингтон (Сиэтл, США), будучи сейчас почетным профессором физического факультета. Член Лондонского королевского общества, Американского физического общества, Американской академии искусств и наук и Национальной академии наук США.

Дункан Холдейн (F.Duncan M.Haldane) родился в Лондоне 14 сентября 1951 г., образование и ученую степень по физике (1978) под руководством Ф.Андерсона получил в Кембриджском университете. После защиты четыре года был сотрудником Института имени Лауэ и Ланжевена во Франции, затем переехал в США, где работал в Университете Южной Калифорнии, в Bell Telephone Laboratories и, наконец, в Принстонском университете, профессором физического факультета которого он остается и поныне. Член Лондонского королевского общества, Американской академии искусств и наук, Американского физического общества, Института физики (Великобритания), Американской ассоциации содействия развитию науки.

Майкл Костерлиц (J.Michael Kosterlitz) родился в шотландском городе Абердин 22 июня 1942 г. Его отец, знаменитый биохимик Ханс Костерлиц, эмигрировал с семьей из Германии в 1934 г. В 1966 г. Майкл окончил Кембриджский университет, в 1969 г. защитил диссертацию в Оксфордском университете по физике высоких энергий. Проработал ряд лет в Бирмингемском университете,



Дэвид Таулесс.



Дункан Холдейн.



Майкл Костерлиц.

сменив в 1971 г. научную тематику, а затем уехал в США, где в разное время был исследователем и преподавателем в Корнельском, Принстонском, Гарвардском университетах, Bell Telephone Laboratories. С 1982 г. — профессор Брауновского университета (Провиденс). Член Американского физического общества и Американской академии искусств и наук.

Возникновение определенных свойств твердых и жидких веществ, таких как сверхпроводимость, сверхтекучесть, ферромагнетизм и др., согласно Л.Д.Ландау, принято описывать как возникновение порядка из неупорядоченного состояния — порядка, который спонтанно, т.е. без внешних воздействий, нарушает симметрию системы. Порядок, нарушающий симметрию беспорядка, — звучит парадоксально. Но это в самом деле так.

Например, переход из жидкого состояния в кристаллическое со строго периодическим пространственным расположением атомов ликвидирует симметрию по отношению к произвольным сдвигам и поворотам, характерную для жидкости с ее беспорядочным, хаотическим атомарным распределением. Кристалл совпадает сам с собой только при определенных поворотах и сдвигах, тогда как жидкость — при любых. Поэтому хаотическое жидкое состояние существенно более симметрично, нежели упорядоченное кристаллическое.

Магнитное упорядочение убирает симметрию по отношению к обращению времени, поскольку при течении времени вспять меняется направление электрических токов и, следовательно, направление создаваемых ими магнитных моментов и полей. Для неупорядоченного, или парамагнитного, состояния вещества характерно хаотическое пространственное распределение атомарных магнитных моментов. Поэтому обращение направления времени не меняет состояния системы с нулевым магнитным моментом, тогда как в ферромагнитном состоянии все атомарные моменты упорядочиваются вдоль одного определенного направления. Тем самым изменение направления времени меняет направление магнитного момента системы, что порождает асимметрию относительно обращения направления времени.

Переход в сверхпроводящее состояние связан с нарушением так называемой калибровочной инвариантности — с появлением зависимости состояния вещества от фазы волновой функции частиц, образующих сверхтекучий конденсат.

Оказалось, однако, что не все виды упорядоченных состояний могут быть описаны в рамках концепции исчезновения какой-либо конкретной симметрии. В работах трех авторов, удостоенных Нобелевской премии, развиты теории именно таких упорядоченных состояний вещества, которые возникают БЕЗ спонтанного нарушения симметрии:

— в сверхпроводящих, магнитных или кристаллических пленках;

— в двумерном электронном газе в полупроводниковых гетероструктурах (что порождает удивительное явление квантования холловского сопротивления);

— в цепочках частиц с целочисленным спином с антиферромагнитным взаимодействием, имеющих энергетическую щель в спектре возбуждений.

Начнем с работ 1972–1973 гг., в которых Костерлиц и Таулесс развили теорию фазовых переходов в двумерных системах, таких как пленки жидкого гелия, сверхпроводящие пленки и двумерные планарные магнетики [1, 2]. В чем же состоит отличие фазовых переходов в пленках от фазовых переходов в обычных трехмерных системах? Чтобы не вдаваться в математические тонкости, проще всего это понять на примере всем известного фазового перехода плавления, т.е. перехода из твердого кристаллического в жидкое состояние вещества. Кристалл характеризуется периодическим пространственным распределением атомов и определенной симметрией относительно пространственных сдвигов и поворотов. Атомы совершают колебания около положений равновесия, амплитуда которых возрастает с температурой, и при некоторой температуре атомы покидают свои равновесные положения — происходит переход в жидкое состояние. Таким образом, пропадает строго периодический дальний порядок и вместе с ним пропадает еще одно существенное свойство твердого тела — исчезает модуль сдвига, т.е. способность твердого тела сопротивляться не только сжатию, но и сдвигу одного его слоя относительно другого.

Чем отличается от объемного кристаллического упорядочение в пленке? Еще в довоенные годы Ландау и Пайерлсом было показано, что в двумерном случае нет кристаллического дальнего порядка. Если в трехмерном кристалле одинаковые атомы колеблются около строго эквидистантных положений равновесия, то в пленке эта эквидистантность нарушена. Кристаллический порядок слегка поплыл, исчезла возможность приписать каждому атому равновесное положение. Оказывается, однако, что корреляция расположений атомов относительно друг друга убывает достаточно медленно, как степенная функция расстояния между ними, т.е. упорядочение частично сохраняется. В следствие чего в таком упорядоченном состоянии без дальнего порядка имеется конечный модуль сдвига, что и отличает это состояние от жидкости. Как же и при какой температуре происходит фазовый переход плавления? Было показано, что это происходит путем разрушения ближнего кристаллического порядка посредством рождения определенных топологических искажений кристаллической структуры, известных кристаллографам под названием *дислокаций*. Свободная энергия дислокаций в точке перехода обращается в ноль, энергетический барьер, препятствующий их рождению, исчезает, расположе-

ние атомов становится хаотическим, и модуль сдвига обращается в ноль.

Сказанное о двумерных кристаллах верно и для двумерных сверхпроводящих и сверхтекучих систем. Если в трехмерном случае состояние сверхтекучей жидкости описывается комплексной волновой функцией конденсата $\Psi = |\Psi|e^{i\phi}$, то в сверхтекучих пленках понятие фазы ϕ в данной точке жидкости теряет смысл — из-за тепловых флуктуаций ее отклонения от любого фиксированного значения велики, что и означает отсутствие дальнего порядка. Однако разность фаз в двух точках (разность двух больших чисел) мала и достаточно медленно возрастает с расстоянием между этими точками. Дальнего порядка нет, но ниже определенной температуры возникает так называемый *топологический дальний порядок*, связанный с тем, что изменение фазы волновой функции при обходе по любому замкнутому контуру в плоскости пленки квантуется, т.е. оказывается равным $2\pi N$, где N целое число. Возбужденные состояния жидкости, при обходе которых имеется такой набег фазы, носят название *квантованных вихрей* — аналога дислокаций в двумерных кристаллах. Как и в обычной трехмерной сверхтекучей жидкости, в пленках имеется сверхтекучая, т.е. способная к бездиссипативному течению, компонента с плотностью ρ_s — аналогом модуля сдвига в двумерных кристаллах. В отличие от трехмерного случая сверхтекучесть в пленках возникает скачком, причем величина скачка сверхтекучей плотности связана с температурой перехода T_c универсальным соотношением

$$\Delta\rho_s = 2m^2T_c/\pi\hbar^2$$

(где m — масса атома, \hbar — постоянная Планка), выполнение которого соответствует обращению в ноль свободной энергии квантованных вихрей, что и разрушает топологический дальний порядок. Это соотношение проверено экспериментально в пленках гелия-4 [3].

За год до появления работ Костерлица и Таулесса ряд основополагающих результатов, касающихся специфического низкотемпературного упорядочения в двумерных системах, был получен в работах нашего безвременно ушедшего соотечественника Вадима Березинского [4, 5]. Именно он указал на существование низкотемпературной фазы в пленках жидкого гелия, обладающей конечной плотностью сверхтекучей компоненты. Идеи Вадима активно обсуждались в Институте Ландау с участием Анатолия Ларкина, Валерия Покровского и Александра Полякова (ныне профессора Принстонского университета), который впоследствии показал [6], что степенные или алгебраические корреляции, изучавшиеся Березинским в планарных двумерных системах, скажем, в магнетиках со спинами, лежащими в плоскости, не имеют места в двумерных магнетиках со спинами, принимающими произвольное пространственное направ-

ление. Это связано с появлением так называемых *скирмионных топологических возмущений*. Эти же возмущения, как было впервые замечено другим нобелевским лауреатом 2016 г. Дунканом Холдейном [7], служат источником щели в спектре возмущений в одномерных цепочках целочисленных спинов с антиферромагнитным взаимодействием, заставляющим соседние спины принимать противоположную ориентацию. Хотя, начиная с первых работ, Костерлиц и Таулесс ссылались на работы Березинского, но, как это часто бывает, другие западные авторы замалчивали приоритет Вадима. Однако постепенно все стало на свои места, и нынче в физической литературе общепринято название *фазовый переход Березинского—Костерлица—Таулесса*, или просто *БКТ-переход* (см. книгу «40 Years of Berezinskii—Kosterlitz—Thouless Theory» (World Scientific, 2013)). Многие результаты Березинского изложены в его диссертации «Низкотемпературные свойства двумерных систем с непрерывной группой симметрии», опубликованной с подачи его коллег и друзей в виде книги издательством «Физматлит» в 2007 г.

Топологические методы нашли применение и в физике совершенно другого явления — квантового эффекта Холла. Напомним, что эффектом Холла называется явление падения напряжения в проводнике, который находится в поперечном току магнитном поле, в направлении, перпендикулярном движению тока и магнитному полю. За экспериментальное открытие квантового эффекта Холла в двумерном электронном газе при низких температурах, где холловская проводимость принимает в широких интервалах магнитного поля постоянные значения — *плато*, являющиеся с удивительной точностью целыми кратными величины $e^2/2\pi h$, Клаус фон Клитцинг в 1985 г. был удостоен Нобелевской премии.

Квантово-механическая задача о движении не взаимодействующих электронов в магнитном поле H была решена Ландау, который показал, что их энергия квантуется: $E_n = (e\hbar H/mc)(n + 1/2)$, где e — заряд электрона, а c — скорость света, и каждый уровень энергии сильно вырожден, т.е. одному и тому же уровню соответствует много электронных состояний. Этих состояний на каждом уровне Ландау ровно столько, сколько квантов магнитного потока $\Phi_0 = 2\pi\hbar c/e$ приходится на единицу площади, перпендикулярной магнитному полю.

Квантовый эффект Холла наблюдается в двумерных системах электронов в хаотическом потенциале, медленно меняющемся в пространстве. Электроны, находящиеся в состояниях с энергией выше последнего заполненного уровня Ландау, не вносят никакого вклада в холловскую проводимость. В области полей, соответствующих данному плато, продольное сопротивление равно нулю, как будто система обладает свойством сверхтекучести! На деле в этом интервале магнитных полей все состояния внутри слоя, содержащего электроны, ло-

кализованы, а по краям текут токи, в равновесии подобные бездиссипативным внутримолекулярным токам.

В 1982 г. в работе Дэвида Таулесса, Махито Комото, Питера Найтингейла и Марселя ден Нийса [8] было установлено интересное соответствие между топологическими концепциями и квантованием холловской проводимости в двумерном электронном газе. Упомянутое выше вырождение состояний, соответствующих данному уровню Ландау, математически описывается как вырождение по квазиимпульсу в решетке магнитных трансляций — воображаемой кристаллической решетке, на каждую ячейку которой приходится один квант магнитного потока.

В работе 1982 г. было показано, что холловская проводимость в двумерном электронном газе в перпендикулярном плоскости магнитном поле принимает квантованные значения $\sigma_H = Ne^2/2\pi h$, где целое число N есть число полностью заполненных уровней Ландау. Иначе говоря, на каждый заполненный уровень Ландау приходится по одному кванту холловской проводимости $N = 1 + 1 + 1 + \dots$. Каждая из единиц в этой сумме — это номер так называемого *класса Черна* — степени отображения* элементарной ячейки (ячейки Бриллюэна) обратного пространства (пространства волновых векторов) в решетке магнитных трансляций на область изменения нормализованной комплексной блоховской функции электронов в этом кристалле. В то же время при полном обходе ячейки Бриллюэна вдоль ее границы фаза блоховской волновой функции (*фаза Берри*) изменяется на 2π . Состояниям, соответствующим незаполненному уровню Ландау, отвечает обход по контуру, проходящему внутри ячейки Бриллюэна, дающий нулевой набег фазы. Этот важный математический факт объясняет явление целочисленного квантового эффекта Холла, который наблюдается в двумерных системах электронов в хаотическом потенциале, медленно меняющемся в пространстве. Число N , фиксирующее плато в холловской проводимости в широком интервале магнитных полей, суть число уровней Ландау, расположенных ниже химического потенциала, который служит границей между заполненными и незаполненными состояниями при нулевой температуре. Таким образом, электроны, находящиеся в состояниях с энергией выше последнего заполненного уровня, не вносят никакого вклада в холловскую проводимость. О квантовом эффекте Холла и других применениях топологии в физике можно прочесть в книге Дэвида Таулесса «Topological Quantum numbers in Nonrelativistic Physics» (World Scientific, 1998), содержащей также статьи других авторов на эту тему.

* Отображение — соответствие по определенному правилу между точками двух геометрических фигур. Отображение обобщает понятие функции. Как и многозначная функция, отображение может быть многократным. Кратность отображения характеризуется целым числом — степенью отображения.

Важное следствие работы четырех авторов — возможность появления плато в холловской проводимости без внешнего магнитного поля в системах с уровнем Ферми, лежащим внутри энергетической щели. Такая ситуация реализуется в модели из двух подрешеток с комплексным интегралом перескока электронов между атомами в каждой из них, которую впервые изучил Холдейн в 1988 г. [9], а три года назад удалось реализовать экспериментально [10].

Как уже было упомянуто, в 1983 г. Холдейн предложил [7] континуальное описание для дискретных одномерных спиновых цепочек с целочисленным спином при антиферромагнитном взаимодействии между спинами (такого рода объекты встречаются среди сильно анизотропных органических соединений). Утверждение Холдейна, основанное на работе Полякова [6], состояло в том, что возбужденные состояния, которые возникают в результате специфического пространственно-временного отклонения спинов цепочки от равновесного направления, получивших название *инстантонов*, отделены от основного состояния системы энергетической щелью (*щелью Холдейна*). Что и отличает спектры возбуждений цепочек с целочисленным спином от бесщелевых спектров цепочек с полужелым спином, найденных еще в довоенные годы Хансом Бете (лауреатом Нобелевской премии 1967 г. за теорию ядерного синтеза в звездах). Любопытно, что термин *гипотеза Холдейна* употребляли зачастую те, кто не верил в такое различие спектров. Сейчас это проверенный экспериментально и твердо установленный теоретически факт.

Оставляя за кадром математику, можно описать происходящее следующим образом. Основное состояние цепочки антиферромагнитно, т.е. направление любых двух соседних спинов противоположно, что соответствует минимуму энергии взаимодействия спинов между собой. Можно сказать, спины строго чередуются в последовательности: ...вверх, вниз, вверх, вниз... Проскальзывание инстантона переворачивает один из спинов в конфигурацию, параллельную соседям: ...вверх, вниз, вверх, вверх, вверх, вниз, вверх... Возникает проигрыш в энергии взаимодействия — это и есть щель E , отделяющая возбужденное состояние от основного. Ее можно измерить посредством неупругого рассеяния нейтронов на веществах, содержащих одномерные или квази-одномерные спиновые цепочки.

Возбужденное состояние с перевернутым спином обладает избыточным по отношению к основному состоянию магнитным моментом, взаимодействующим с магнитным полем H по закону $-MH$, где M — проекция магнитного момента на направление поля. Согласно квантовой механике, проекция спина, равного единице (спин, как и орбитальный момент, измеряется в квантах действия, т.е. в постоянных Планка), на направление поля

может принимать только три значения, равные +1, -1, 0. Таким образом, во внешнем поле уровень энергии возбужденного состояния расщепляется на три уровня с энергиями: E , $E + MH$ и $E - MH$. Расщепление энергии возбуждений в магнитном поле также измерено экспериментально.

Увеличивая поле, можно обнулить энергию одного из типов возбужденных состояний ($E - MH = 0$). В таком поле возбуждения с нулевой энергией будут рождаться самопроизвольно. Возникнет

макроскопически большое количество таких возбуждений в одном и том же квантовом состоянии. Это явление принято называть бозе-эйнштейновской конденсацией магнонов. Но это уже другая история, не имеющая прямого отношения к теме нашего рассказа.

© В.П.Минеев,

доктор физико-математических наук
Институт теоретической физики имени Л.Д.Ландау
г.Черноголовка (Московская обл.)

Литература

1. *Kosterlitz J.M., Thouless D.J.* Long range order and metastability in two dimensional solids and superfluids (Application of dislocation theory) // *J. of Phys. C: Solid State Physics*. 1972. V.5. P.1124–126.
2. *Kosterlitz J.M., Thouless D.J.* Ordering, metastability and phase transitions in two-dimensional systems // *J. of Phys. C: Solid State Physics*. 1973. V.6. P.1181–1203.
3. *Bishop D.J., Reppy J.D.* Study of the superfluid transition in twodimensional ⁴He films // *Phys. Rev. Lett.* 1978. V.40. P.1727–1730.
4. *Березинский В.Л.* Разрушение дальнего порядка в одномерных и двумерных системах с непрерывной группой симметрии. I. Классические системы // *ЖЭТФ*. 1970. Т.59. Вып.3. С.907–920 (*Sov. Phys. JETP*. 1971. V.32(3). P.493–500).
5. *Березинский В.Л.* Разрушение дальнего порядка в одномерных и двумерных системах с непрерывной группой симметрии. II. Квантовые системы // *ЖЭТФ*. 1971. Т.61. Вып.3. С.1144–1156 (*Sov. Phys. JETP*. 1972. V.34(3). P.610–616).
6. *Polyakov A.M.* Interaction of Goldstone particles in two dimensions, applications to ferromagnets and massive Yang-Mills fields // *Physics Letters B*. 1975. V.59. P.79–81.
7. *Haldane F.D.M.* Nonlinear field theory of large-spin Heisenberg Antiferromagnets: Semiclassically Quantized Solitons of the one-dimensional easy-axis-Neel State // *Phys. Rev. Lett.* 1983. V.50. P.1153–1156.
8. *Thouless D.L., Kohmoto M., Nightingale M.P., Den Nijs M.* Quantized Hall conductance in a two-dimensional periodic potential // *Phys. Rev. Lett.* 1982. V.49. P.405–408.
9. *Haldane F.D.M.* Model for a quantum Hall effect without Landau levels: condensed-matter realization of the «parity anomaly» // *Phys. Rev. Lett.* 1988. V.61. P.2015–218.
10. *Chang C.Z., Zhang J., Feng X. et al.* Experimental observation of the quantum anomalous Hall effect in a magnetic topological insulator // *Science*. 2013. V.340. P.167–170.

По химии — Ж.-П.Соваж, Ф.Стоддарт, Б.Феринга

Нобелевская премия по химии 2016 г. присуждена профессорам Жан-Пьеру Соважу (Jean-Pierre Sauvage, Университет Страсбурга, Франция), Джеймсу Фрезеру Стоддарту (James Fraser Stoddart, Северо-Западный университет, Эванстон, США) и Бернарду Лукасу Феринге (Bernard Lukas Feringa, Университет Гронингена, Нидерланды) «за дизайн и синтез молекулярных машин».

Ж.-П.Соваж родился в 1944 г. в Париже, изучал химию в Университете Луи Пастера (Страсбург), где в 1971 г. успешно защитил диссертацию под руководством Жан-Мари Лена. Затем получил позицию исследователя CNRS (Национального центра научных исследований Франции) и в 1973–1974 гг.

стажировался в Оксфорде у Малькома Грина. В 1980 г. организовал Лабораторию неорганической химии (Laboratoire de Chimie Organo-Minérale, Страсбургский университет), директором которой был до 2009 г. С тех пор Соваж — почетный профессор Страсбургского университета, почетный директор CNRS. Член-корреспондент Академии наук Франции с 1990 г., действительный член Академии наук Франции с 1997 г., иностранный член РАН с 2016 г. Научные интересы Соважа включают молекулярные машины и механически сцепленные молекулы (mechanically interlocked molecules), в том числе катенаны, ротаксаны и узлы. Первым получил узел-трилистник [1] и молекулярный мускул [2].