

НАУЧНОЕ НАСЛЕДИЕ Л. Д. ЛАНДАУ И СОВРЕМЕННОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Н. Н. Барабанов, учитель ОМЦ ЦОУО ДО г. Москвы

Великий ученый, блестящий педагог, создатель крупной научной школы — таким вошёл в историю отечественной и мировой науки XX века Лев Давидович Ландау. Вклад, который он внес в физику, непреходящ по своей значимости. Это касается как непосредственно научной деятельности Л. Д. Ландау, так и его педагогической работы.

1. НАУЧНОЕ НАСЛЕДИЕ ЛЬВА ЛАНДАУ

Изучение теоретической физики ныне немислимо без основательного штудирования многотомного курса, написанного им совместно с коллегой Е. М. Лифшицем. Ими же (совместно с А. И. Ахиезером) еще до войны был написан учебник по курсу общей физики, в котором были изложены основы механики и молекулярной физики. Эта книга, впервые изданная в середине 1960-х годов, в высшей степени полезна и тем, кто изучает физику (подчеркнём: не только студентам, но и подготовленным старшеклассникам), и тем, кто ее преподаёт как в средней, так и в высшей школе. Полезна потому, что в ней гармонично сочетаются такие ценнейшие для учебника качества, как компактность изложения материала и редкая по глубине научной мысли точность формулировок при минимальном использовании математического аппарата.

Многие школьные учителя физики не мыслят своей повседневной работы без активного использования книги Л. Д. Ландау и А. И. Китайгородского «Физика для всех», а широкому кругу читателей адресована увлекательнейшая книжка «Что такое теория относительности», которую Л. Д. Ландау написал еще в предвоенные годы вместе со своим коллегой Ю. Б. Румером. Остается лишь глубоко сожалеть о том, что Лев Давидович не успел написать по физике и математике для средней школы, хотя о своем желании сделать это он говорил неоднократно.

О каких же научных работах Л. Д. Ландау целесообразно говорить сегодня в школе на уроке физики и как это можно сделать в доходчивой для ученика форме?

Подчеркнём сразу: о многом сказать не удастся, ибо «адаптированное» изложение в школе теоретической физики невозможно принципиально. Однако даже с такой оговоркой учитель может рассказать школьнику о многом. Например, о том, что Л. Д. Ландау в 1937 г. теоретически предсказал существование нейтронных звезд, открытых за год до его смерти, в 1967 г., и называемых ныне пульсарами. О том, что еще в предвоенные годы он стал



заниматься физикой сверхпроводимости, а в 1950 г. совместно с В. Л. Гинзбургом разработал феноменологическую теорию сверхпроводимости, которая во многом стала основой более поздней теории этого важнейшего физического явления — удостоенной в 1957 г. Нобелевской премии теории Бардина — Купера — Шриффера (США), математическую интерпретацию которой тогда же предложил выдающийся советский физик-теоретик, академик Н. Н. Боголюбов.

Наконец, существуют такие работы Л. Д. Ландау, о которых с учащимися на уроке физики можно говорить достаточно обстоятельно и на которых следует остановиться отдельно.

2. О ВТОРОМ ЗАКОНЕ ТЕРМОДИНАМИКИ

При изучении в 10-м классе законов термодинамики предметом разговора может быть небольшая статья «Второй закон термодинамики и Вселенная», которую Л. Д. Ландау написал в возрасте 25 лет, в 1933 г., совместно с М. П. Бронштейном¹.

Конкретно речь идет о следующем. Допустим, имеется физическая система, находящаяся в кинетическом равновесии с окружающими телами. Эта система на некоторое время изолируется, однако не настолько, чтобы пренебрегать флуктуационными процессами. Тогда график зависимости энтропии от времени будет выглядеть так, как показано на рис. 1 — моменты 1 и 2 соответствуют началу и концу изолированного состояния. Начиная с момента изоляции, энтропия системы растёт, достигает максимума и сохраняет это максимальное значение до момента 2, т. е. до установления кинетического равновесия.

¹ Один из талантливейших советских физиков-теоретиков Матвей Петрович Бронштейн был расстрелян как «враг народа» в 1938 г., в возрасте 32 лет.

Пусть теперь направление оси времени изменяется. Л. Д. Ландау и М. П. Бронштейн характеризуют ситуацию так: «Обратный процесс означает, что в момент 3 энтропия начнёт возрастать, как если бы система заранее знала, что через определённый момент времени она будет изолирована. Мы склонны объяснять такое поведение невозможным, ибо будущее не может иметь никакого влияния на поведение физических тел. Однако это утверждение — чистой воды филология, поскольку вообще не ясно, каким образом из классической механики можно сделать вывод, что одно направление времени обладает свойствами, отличными от свойств другого направления». Иными словами, если любой механический процесс снять на киноплёнку, то законам механики не противоречит и то, что мы увидим при ее обратной «прокрутке». Но такого не может быть в случае термодинамического процесса, и потому: «Проблема как раз и состоит в определении источника этой асимметрии».

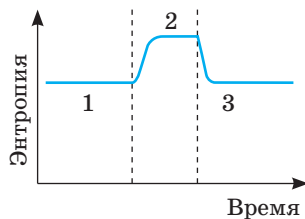


Рис. 1

Эту проблему Л. Д. Ландау и М. П. Бронштейн анализируют с помощью статистических методов. Главный итог их анализа сводится к следующему: «Если представить себе Вселенную как единую замкнутую систему, подчиняющуюся классической или волновой механике, то мы вынуждены были бы заключить вместе с Больцманом, что мир как целое находится в состоянии статистического равновесия. Больцман пытался совместить это следствие с явным отсутствием статистического равновесия в наблюдаемой части Вселенной при помощи своей известной флуктуационной гипотезы. То обстоятельство, что нам удалось стать свидетелями столь чудовищной флуктуации, Больцман стремился объяснить тем, что как раз осуществление такой флуктуации и является необходимым условием существования наблюдателя (т. е. подходящих условий для биологического развития организмов и т. д.). Однако его довод полностью ошибочен, ибо в такой флуктуационной Вселенной существование одного-единственного наблюдателя без приготовленной для него сцены, наполненной мириадами звезд, отвечало бы несравненно большей энтропии и, следовательно, в чудовищной степени большей вероятности».

На деле этого нет, а значит, во Вселенной нет и статистического равновесия. И потому во Вселенной есть область, где законы классической и квантовой механики не выполняются: «Это делает оба направления временной оси неэквивалентными: направление времени, которое совпадает с возрастанием энтропии каждой системы, изолированной

от окружающего мира на слишком долго время, мы называем будущим по определению; классической механике понятия прошедшего и будущего полностью чужды. Только тогда второй закон термодинамики станет законом возрастания энтропии. Этот закон, равно как и известное всем из повседневного опыта самое существование прошедшего и будущего, возможен только потому, что мир как целое не подчиняется законам термодинамики».

Вполне вероятно, что некоторые учителя, прочитав выдержки из статьи Л. Д. Ландау и М. П. Бронштейна, скажут: понятие энтропии в курсе физики средней школы не изучается, и потому обсуждение подобных вопросов на уроке невозможно. Ответим на это следующим образом: крайне важно довести до сознания учащихся мысль о том, что изучаемые физические законы имеют границы применимости. И еще одно нужно отметить: ныне статья Л. Д. Ландау и М. П. Бронштейна в известной степени представляет исторический интерес — последующее развитие как физики, так и астрономии показало, что реальное положение дел намного сложнее.

3. О ФИЗИКЕ МАГНЕТИЗМА

А на уроках физики в 11 классе особое внимание следует обратить на работы Л. Д. Ландау 1930-х годов, относящиеся к физике магнетизма. Прежде всего — на исследования природы ферромагнитных явлений, тем более что эти явления изучаются в школьном курсе физики, являясь программным материалом. Как правило, на уроках мы говорим школьникам о том, что ферромагнетики имеют большую магнитную проницаемость, которая обусловлена особенностями их внутреннего строения, конкретно — наличием у них доменной структуры. Реже упоминается, что гипотезу о существовании доменов высказал в 1907 г. французский физик П. Вейсс. Еще реже говорится о том, что гипотезу Вейсса теоретически обосновал его современник — выдающийся французский физик П. Ланжевен. Иногда упоминается о том, что домены можно наблюдать под микроскопом с помощью метода порошковых фигур, который впервые предложили в конце 1920-х годов советские физики Е. С. Акулов и М. В. Дехтяр. И крайне редко на уроках физики говорится о том, что в 1935 г. Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц на квантовом уровне объяснили причину существования доменной структуры у ферромагнетиков. Главным в данном случае является то, что данная структура соответствует минимальной энергии магнитного поля и это ведет к устойчивому термодинамическому равновесию системы (рис. 2).

В статье «Возможное объяснение зависимости восприимчивости от поля при низких температурах» Л. Д. Ландау внёс ряд важных уточнений

в понимание физического смысла точки (или температуры) Кюри как о точке фазового перехода. Переход через точку Кюри относится именно к фазовому переходу второго рода — кристаллическая решётка не разрушается, но ферромагнетик размагничивается.

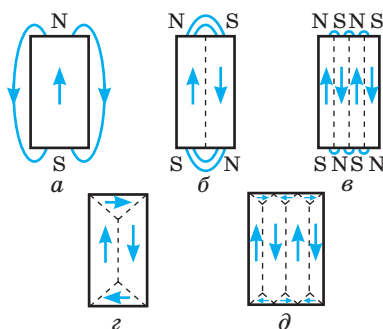
Вот что писал Л. Д. Ландау о свойствах хлоридов хрома, двухвалентного железа, кобальта и никеля, которые являются ферромагнетиками при обычных температурах и не обладают магнитными свойствами при низких: «При низких температурах мы имеем спонтанно намагниченные слои, чьи магнитные моменты, однако, ориентированы в противоположных направлениях, так что спонтанное намагничение макроскопических областей, а следовательно, и ферромагнетизм, отсутствует. Так как противоположное ориентирующее взаимодействие между различными слоями сравнительно мало, то достаточно присутствия уже сравнительно слабого поля, чтобы сильно изменить противоположную ориентацию моментов. Это приводит также к отклонению от линейной зависимости суммарного момента от поля и, в конце концов, даже к явлениям насыщения, состоящих в том, что магнитное поле ориентирует магнитные моменты параллельно своему направлению».

И далее: «...названные тела должны обладать, как и ферромагнетики, точкой Кюри, в которой спонтанная намагниченность каждого слоя обращается в нуль. Аналогично в этой точке Кюри следует ожидать скачка теплоемкости, величина которого должна вычисляться точно так же, как и у ферромагнетиков».

При фазовых переходах второго рода скачком меняются теплоемкость, коэффициент теплового расширения, сжимаемость — это также показал Л. Д. Ландау. При этом, в частности, скачкообразный рост теплоемкости (с последующим падением) наблюдается именно при температуре Кюри, т. е. при резком падении намагниченности.

Теперь — о явлении диамагнетизма и о вкладе Л. Д. Ландау в изучение этого явления. Упомянуть об этом явлении на уроке следует уже потому, что диамагнетизм есть пример изучаемого в школе явления электромагнитной индукции. Конкретно речь идет о следующем:

1. Если некоторое тело вносится во внешнее магнитное поле, то данное поле действует на электроны в атомах, что приводит к возникновению круговых индукционных токов. Тогда в соответствии с правилом Ленца в каждом атоме возникает индукционное магнитное поле, противоположное внешнему полю, что и является причиной выталкивания диамагнетика из внешнего поля. Принципиально,



■ Рис. 2

что диамагнетизм в той или иной степени присущ вообще всем телам (а не только тем, которые собственно и называются диамагнетиками) именно как проявление электромагнитной индукции.

2. Если это так, то можно рассмотреть влияние внешнего магнитного поля на электроны проводимости в металлах и полупроводниках. Такое влияние Л. Д. Ландау теоретически исследовал в 1930 г. (ему тогда было 22 года), показав, что искривление траекторий электронов, обусловленное действием на них силы Л. Д. Лоренца, также дает диамагнитный эффект, когда электроны проводимости движутся по спиральным квантованным орбитам. Данный эффект особенно заметен там, где орбиты охватывают много атомов, например, в висмуте и графите. В последнем диамагнетизм проявляется анизотропно: кристаллы графита имеют форму гексагональных призм, и движение свободных электронов происходит в основном в плоскостях, параллельных плоскости основания призмы. Диамагнитная восприимчивость графита максимальна ($-260 \cdot 10^{-6}$) в направлении оси призмы и минимальна ($-6 \cdot 10^{-6}$) в направлениях, параллельных плоскости основания призмы. Напоминаем, что магнитная восприимчивость χ и упоминаемая в школьном курсе физики магнитная проницаемость среды μ связаны между собой соотношением $\chi = \mu - 1$. Отметим, что предсказанный Л. Д. Ландау диамагнетизм свободных электронов на опыте наблюдать затруднительно по причине крайней слабости эффекта: он, например, втрое слабее парамагнетизма, обусловленного собственными магнитными моментами электронов.

4. «НОБЕЛЕВСКАЯ» РАБОТА ЛЬВА ЛАНДАУ

Л. Д. Ландау был удостоен Нобелевской премии по физике в 1962 г. Из всех нобелевских лауреатов Л. Д. Ландау был единственным, кому премия вручалась не на торжественной церемонии в Стокгольме, а в московской больнице, где учёный медленно и мучительно возвращался к жизни после автомобильной катастрофы. Беда случилась 7 января 1962 г. на Дмитровском шоссе, когда в «Волгу», на которой Л. Д. Ландау ехал в Дубну, в Объединенный институт ядерных исследований, во время сильнейшего гололеда врезался встречный самосвал. Сознание вернулось к Л. Д. Ландау спустя полгода, в июне, а премию ему вручал посол Швеции 10 декабря. Вручал за работу, выполненную в 1940–1941 гг.

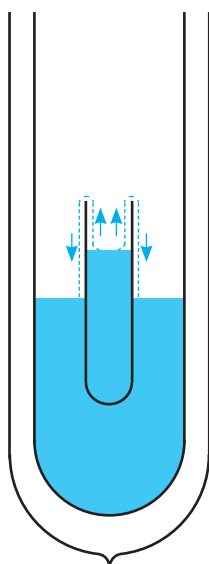
В 1937–1938 гг. П. Л. Капица¹ открыл и экспериментально исследовал в Институте физических

¹ П. Л. Капица стал лауреатом Нобелевской премии по физике в 1978 г.

проблем Академии наук СССР явление сверхтекучести жидкого гелия при температурах, близких к абсолютному нулю. Л. Д. Ландау же был ведущим теоретиком этого института и, по мнению директора института, П. Л. Капицы, единственным человеком, способным это явление объяснить.

Сущность физической проблемы заключалась в следующем. Известно, что газообразный гелий переходит в жидкое состояние при температуре 4,2 градуса по абсолютной (кельвиновской) температурной шкале. Однако при дальнейшем охлаждении, как показали опыты П. Л. Капицы, достигнув температуры 2,2 К, жидкий гелий испытывает фазовый переход 2 рода и становится абсолютно текучим, т. е. полностью теряет вязкость: через очень узкий капилляр (диаметром порядка 0,5 мкм) он просачивается за несколько секунд, в то время как аналогичному объёму воды понадобилось бы для этого несколько суток. Кроме того, если пробирку, заполненную сверхтекучим гелием — будем называть его HeII в отличие от HeI, существующего в температурных пределах от 4,2 до 2,2 К — поместить в сосуд, также заполненный сверхтекучим гелием при условии, что уровень гелия в пробирке выше, чем во внешнем сосуде, то через некоторое непродолжительное время эти уровни уравниваются, как это показано на рисунке 3.

Обычно мы говорим на уроках физики о том, что законы квантовой механики действуют в микромире. В данном же случае они применяются к видимому невооруженным глазом макрообъекту. Согласно теории Л. Д. Ландау, речь идет о квантовой жидкости, состоящей из двух компонент — нормальной и сверхтекучей. Однако здесь имеется в виду не наличие в природе двух разных «сортов» атомов гелия, а нечто принципиально иное. Все происходит так, как будто существуют некие частицы, переносящие в сверхтекучем гелии дозы, порции энергии. Иными словами, в данном случае можно говорить о квазичастицах, являющихся квантами сверхтекучей жидкости — фононами¹ (квантами звука, ибо характеризуются не световой частотой, как это имеет место для фотонов, а звуковой; энергия фонона равна $\varepsilon = h\nu$, а его импульс — $p = \frac{h}{\lambda}$).



■ Рис. 3

Если жидкость течет по трубе и замедляется, то при этом убывает ее кинетическая энергия. Эта убыль энергии идет на возбуждение фонона, однако при скорости, меньшей определенного предела, энергии может оказаться недостаточно. Тогда энергия фонона будет равна нулю, значит, потерь на трение не будет, а это и есть сверхтекучесть. Кроме того, если при приближении к абсолютному нулю температуры энергия фонона стремится к нулю, то к нулю будет стремиться и импульс фонона. Но из записанной выше формулы для импульса видно, что в этом случае длина волны фонона будет стремиться к бесконечности. Она будет огромна по сравнению с расстоянием между атомами гелия, чем и объясняется его «переползание» из пробирки во внешний сосуд в одном из опытов П. Л. Капицы.

Экспериментально теория Л. Д. Ландау была подтверждена Э. Л. Андроникашвили² в 1946 г. в Институте физических проблем — впоследствии академик Академии наук Грузинской ССР. Стопка из 100 горизонтально расположенных листов алюминиевой фольги была укреплена по центру на тонкую прочную нить. Эта система погружалась в жидкий гелий, и исследовались ее крутильные колебания. При температуре, большей 2,2 К, на листочки налипала некоторая масса жидкого гелия; при температуре, меньшей 2,2 К, на листочки налипала только нормальная составляющая HeII, количество которой убывало с понижением температуры, ибо в этом случае росло количество сверхтекучей составляющей. Следовательно, в опыте должна была убывать масса колебательной системы, а с ней — и период колебаний. Это и наблюдалось на практике.

Л. Д. Ландау увидел в явлении сверхтекучести аналогию со сверхпроводимостью (тоже фазовый переход второго рода). Если охлаждать ртуть, то её электрическое сопротивление убывает по линейному закону, а на отметке 4,2 К скачком падает до нуля.

Изучение механизма явления сверхтекучести в определенном смысле способствовало пониманию механизма сверхпроводимости. Физикой сверхпроводимости Л. Д. Ландау начал заниматься еще в 1937 г., а в 1950 г. совместно с В. Л. Гинзбургом³ и двумя своими учениками, А. А. Абрикосовым и Л. П. Горьковым, построил феноменологическую теорию сверхпроводимости (ГЛАГ-теорию).

Продолжение следует...

¹ Термин (на уровне представления о звуковых квантах) ввел в 1930 г. И. Е. Тамм, исследуя рассеяние электронов в кристаллах. Слово «фонон» для обозначения таких квантов несколько позже предложил Я. И. Френкель.

² Его родным братом был известный литературовед И. Л. Андроников.

³ В 2003 г. вклад А. А. Абрикосова и В. Л. Гинзбурга в исследования в области сверхпроводимости был отмечен Нобелевской премией по физике. 