

# О квантовой природе ТЕПЛОТЫ

В. МИТЮГОВ

**Н**ЕДАВНО попалась мне на глаза олимпиадная школьная задача: «Сконструируйте и продемонстрируйте устройство, которое при хаотическом воздействии движется направленно». Ломать голову в поисках подходящего примера долго не пришлось. Сразу вспомнились летние месяцы послевоенного детства, проводимые мною у родных в деревне. Деревенские ребята научили меня одной занятной затее. Когда куда-нибудь далеко собираешься идти, засунешь под рубашку возле пояса пшеничный колосок и на какое-то время забудешь про него. Потом такие колоски оказываются у кого в рукаве, у кого на спине или еще где. Причина-то и глупому понятна, но результат был всегда удивителен.

Думаю, примеров «механических выпрямителей», преобразующих в поступательное перемещение энергию хаотических движений, можно придумать немало. На этом же принципе основано и действие приливных электростанций, которые строят в подходящих морских заливах. На приливном подъеме воды залив перекрывают заслонкой типа шлюзных ворот, а по мере отлива гидротурбина дает замечательную даровую элек-

троэнергию. Через половину периода приливной волны все можно сделать наоборот и с тем же результатом.

Но приливы и отливы связаны с видимым движением Луны по небосклону, и в них нет ничего хаотического. А что изменилось бы, если бы мы захотели вместо приливов использовать нерегулярные подъемы и опускания уровня? (Например, ветровые нагоны вод Финского залива — читайте «Медный всадник» А.С. Пушкина.) Разве что пришлось бы обустроить специальную контрольно-измерительную службу, которая давала бы сведения для правильного управления заслонкой.

Действующую модель подобной энергетической установки можно построить на небольшом озере или на речке, где есть подходящие гидрофизические условия, или даже в тазу или в луже. Классическая механика и принадлежащая к ней гидродинамика вообще позволяют широко пользоваться масштабным моделированием, изучая крупное на малых моделях и мелкое на больших. И люди этим пользуются.

Перед тем как строить большой корабль, можно изучить его устойчи-

вость и качку в штормовых условиях на маленькой модели. Насколько маленькой? Важно, чтобы волновые свойства поверхности были вполне подобны природе настоящего шторма. Правда известно, что на малых масштабах структура волны существенно зависит от сил поверхностного натяжения, так что чрезмерно уменьшать модель корабля все же не стоит. В свою очередь, поверхностное натяжение вызвано силами молекулярного сцепления и, следовательно, подчинено квантовым законам.

Попробуем сделать уменьшенную настольную модель большого токарного или карусельного станка. Подобрать нужный электромоторчик, мы прекрасно смоделируем все режимы вращения на холостом ходу. Но если мы попытаемся на этой модели станка обточить модель заготовки, что-нибудь да обязательно не заладится. Зернистая поликристаллическая структура металла не обладает свойством «масштабной инвариантности» — в отличие от законов классической механики. Она сформирована квантовыми законами. Так же и миниатюрный резец модели станка состоит из реального металла и уже поэтому не сможет нужным образом работать.

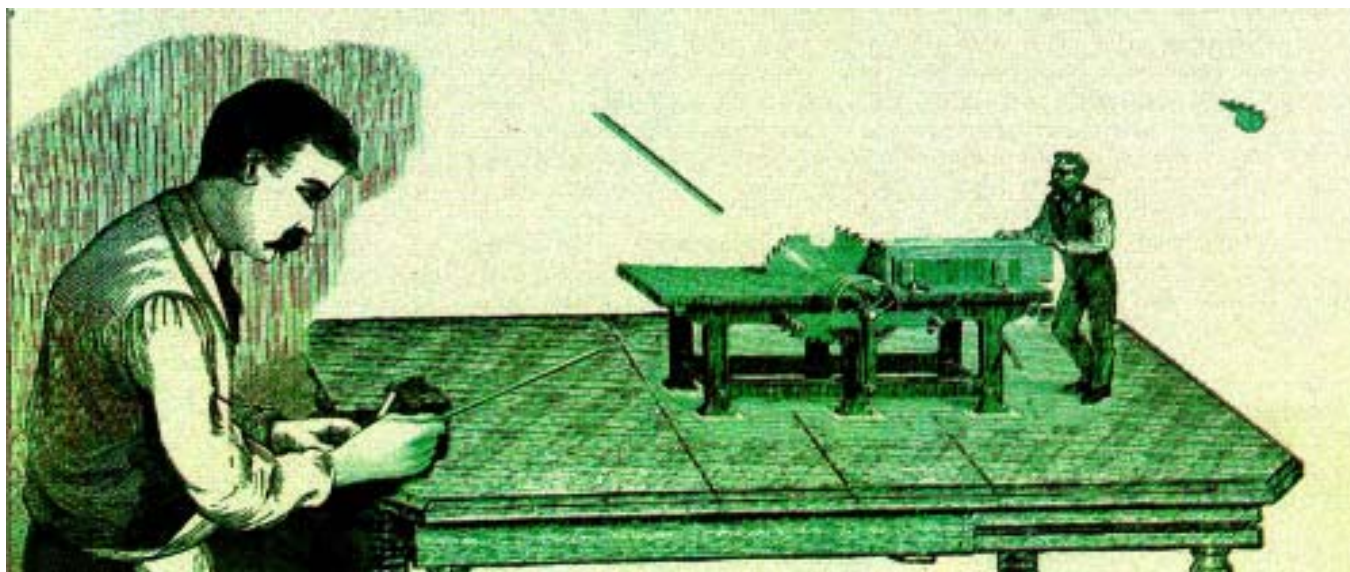


Иллюстрация В. Митюгов

Вернемся к хаотическим движениям. В 1871 году английский физик Дж.К.Максвелл придумал гипотетическое существо, способное в известном смысле «выпрямлять» энергию хаотических движений молекул нагретого газа. Манипулируя крохотной дверцей-заслонкой, это существо могло бы рассортировать по двум половинкам сосуда быстрые и медленные молекулы. Как бы намекая на неосуществимость этого микроскопического агента физическими средствами, Максвелл назвал его «демоном». Если бы он сам в него верил, то назвал бы контролером, вахтером или кем-то еще в этом роде. Что же интуитивно смущало физика?

Кинетические причины тепла и холода были к тому времени для всех наглядно разъяснены трудами М.В.Ломоносова и Д.Бернулли. Понятная всем картина хаотического поведения корпускул нагретого тела навсегда изгнала из науки специальную субстанцию «флогистон» как носителя теплоты. Лишь язык — весьма консервативная штука — и доселе сохранил выражения типа «перетекание тепла». А квантовой теории тогда еще не было и в помине.

Логическая структура классической механики во многом подобна геометрии — дисциплине сугубо математической. И та и другая обладают упоминавшимся выше свойством масштабной инвариантности. Это означает, что при одновременном и произвольном изменении всех пространственных масштабов и законы движения, и отношения чисто геометрического характера сохраняют свои структуры. Свойства медиан треугольника, теорема Пифагора и тому подобное никак не зависят от масштаба. Так же и упругое столкновение двух малых частиц вполне подобно столкновению больших. Когда Э. Резерфорд сконструировал планетарную модель атома, знакомую сейчас каждому школьнику, сразу же появились литературные фантазии насчет разумных обитателей электронов-планет.

Таким образом, при тогдашнем понимании фундаментальных физических законов ничто, вроде бы, не мешало максвелловскому вахтеру-демоу осуществиться хотя бы в качестве толково придуманного автоматического устройства. Сомнение, по-видимому, было в другом.

Еще в 1824 году Сади Карно сформулировал знаменитую теорему о предельных возможностях преобразования теплоты в полезную механическую работу. А через два с небольшим десятилетия результат Карно был обобщен Р.Клаузиусом и У.Томсоном (лордом Кельвином) и возведен в ранг фундаментального принципа — второго начала (закона) термодинамики. Термодинамика становилась в известном смысле самодостаточной, неплохо аргументированной аксиоматической наукой, как бы независимой от классической механики. Она давала отчетливые и разумные ответы на важные для практики вопросы. Например, можно ли отнять энергию тепловых движений у холодного тела и передать горячему, не затратив при этом работы? Нет. А можно ли получить полезную работу за счет разности температур двух тел? Да.

Стройная система термодинамических представлений хорошо согласовывалась практически со всеми наблюдениями естествоиспытателей: биологическими и химическими метаболизмами, планетарными процессами переизлучения солнечной энергии в холодный космос. Если бы кому-то случилось поставить под сомнение или отменить законы Клаузиуса–Томсона–Карно, то многое в нашем понимании живого и так называемого неживого пришлось бы переосмысливать заново (и еще неизвестно, как).

Действительно, тогда позволительно было бы черпать из океана тепловой энергии буквально все (и обогрев, и прохладу в жаркий день). А по мере использования — пожалуйста — пускай даровая энергия возвращается обратно в свой первородный хаос. Это называлось бы *вечным двигателем второго рода*, отнюдь не нарушающим закон сохранения энергии.

Едва ли Максвелл не осознавал всей глубины последствий от реализации своего антитермодинамического «демона». Вернее будет представлять его рассуждения как формулировку ключевого парадокса, вскрывающего принципиальную логическую дилемму для будущего развития всей системы естественных наук. Первая мыслимая возможность — признать необязательность термодинамических ограничений на произвольное извлечение полезной работы

из теплового хаоса. Если так, то представляется загадочным, почему никакие существа не научились этого делать в ходе миллионлетнего развития. Другая возможность — открытие некоего фундаментального закона движения частиц, принципиально необъяснимого с позиций механики Ньютона. Кроме всего прочего, этот закон требовал бы и нарушения принципа масштабной инвариантности при переходе к описанию тепловых микродвижений.

Теперь пора кое-что вспомнить. Мы умышленно забыли на время про квантовую теорию, чтобы исподволь ощутить настоятельную потребность в ее появлении на сцене. Теперь пора. Не будем здесь углубляться в изложение истории возникновения квантовых идей, хотя сама по себе эта история и увлекательна, и драматична. Иногда полезнее сосредоточить внимание на парадоксах науки, которые подобно волшебным дверцам знаменуют переходы в неведомые прежде миры. Очередная такая дверца на нашем пути — знаменитый парадокс Эйнштейна–Подольского–Розена.

Рассмотрим упругое столкновение двух частиц. В классической физике на этой простейшей модели начинают изучение законов сохранения энергии и импульса. Если значения импульсов частиц до столкновения известны, то механика Ньютона позволяет вычислить с полной определенностью и конечные их значения. Задача эта школьная, здесь нет, вроде бы, и намека на возможность какой-то тайны. По крайней мере, пока частицы достаточно крупны и могут быть восприняты как бильярдные шары или что-то в этом роде.

Парадокс возникает при описании такого же столкновения микроскопических частиц методами квантовой теории. И хотя суммарные импульс и энергия по-прежнему в точности сохраняются, каждой из частиц по отдельности оказывается уже невозможным приписать определенные значения импульса и энергии после столкновения. Ситуация действительно кажется парадоксальной. За сотни лет существования классической физики ни разу еще не возникло случая, когда состояния подсистем (частиц) оказывались бы неопределенными при полной физической определенности сложной системы (включающей обе частицы). Подобное труд-

но было даже помыслить. Тем не менее, логическая и математическая структура квантовой теории такую возможность предусматривает.

Множество кажущихся несообразностей с элементарным здравым смыслом появляется, если пытаться обсуждать явления квантового микромира на языке и в образах классической физики. Как об этом неоднократно писал В.Гейзенберг, речь шла о необходимости выработки новой структуры физической интуиции и адекватного ей языка. Это вовсе не означает враждебности образного строя квантовой физики самому человеческому мышлению. Ведь и классическая картина мира не заложена в устройстве наших мозгов — просто мы слишком долго к ней привыкли. Как некая старушка у Ильфа и Петрова не верила в электричество (и только поэтому готовила еду на керосинке), так и современный человек склонен объявить абсурдной физическую ситуацию за пределами знакомой картины столкновения массивных шаров. (Точно так же идея шарообразности Земли овладела умами далеко не сразу.)

Кому-то может показаться, что мы несколько отвлеклись от первоначальной темы. Но собака зарыта именно здесь. Мы добрались до главного — доказательного опровержения принципа масштабной инвариантности при переходе в микромир. Попутно возникла и специфическая, сугубо квантовая неопределенность состояний частиц, при всяком столкновении как бы распыляющая сведения об их предыстории по разнообразным «степеням свободы» открытого мира. Возвращаться к разбору дееспособности пресловутого «демона» на достигнутом теперь новом уровне едва ли стоит — слишком уж наивным представляется сам его замысел, когда идея независимости физических реалий от пространственного масштаба уже разрушена.

Не вдаваясь особенно в детали, эту мысль можно подкрепить анализом размерностей физических величин. Для нарушения принципа независимости законов столкновения от масштаба нужно, чтобы из параметров движения частиц можно было составить еще одну комбинацию с размерностью длины кроме таких, как размеры частиц и протяженность области эффективного взаимодействия при столкновении. Это становится воз-

можным лишь в том случае, если в механике появится добавочная размерная мировая константа. Кстати, первые три закона Ньютона вообще не содержат такой константы. Масса и размер частицы, ее энергия и скорость в классической механике задаются произвольно. Соответственно остается произвольным и выбор пространственно-временной шкалы (линейки и часов). Именно поэтому на возможность масштабного моделирования здесь не наложено никаких ограничений.

В квантовой теории нужная мировая константа есть — это постоянная Планка  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж · с. Движение частицы теперь уже описывается не по Ньютону, а с помощью волновой функции. Представлению о свободном движении частицы массой  $m$  со скоростью  $\vec{v}$  теперь отвечает полет сгустка волн (волнового пакета), пространственные осцилляции внутри которого характеризуются длиной волны де Бройля  $\lambda = h/(mv)$ .

Вот оно! Отношение  $\lambda$  к чисто геометрическим протяженностям как раз и является необходимым безразмерным параметром, по величине или малости которого следует судить о пределах применимости классической механики. Если, скажем, пуля массой 9 г летит со скоростью порядка сотен метров в секунду, то  $\lambda$  составит примерно  $10^{-34}$  м. Ясно, что законы Ньютона здесь будут работать с чудовищным запасом точности. А вот длина волны де Бройля для электрона с энергией в несколько электронвольт уже окажется одного порядка с размером атома водорода и с характерным размером области взаимодействия таких электронов при их столкновении.

Квантовый процесс столкновения частиц хотя и устроен удивительно просто, но для нас пока еще совершенно непривычен. В целом система из двух сталкивающихся частиц не подвергается при этом «хаотизации» в каком-то механическом или другом смысле. В то же время состояние отдельной частицы уже становится неопределенным, при последующих контактах с другими объектами или с наблюдателем она будет вести себя как порождение хаоса.

Именно здесь находится логическое звено, позволяющее согласовать законы механических движений с термодинамическими принципами. Кроме всего прочего, ситуация еще и

удивительно красива. Смотрите, в основе фундаментального понимания природы теплоты лежит какая-то специфическая «неизбыточность» квантового описания вещества. Здесь как бы нет ничего лишнего, но того, что есть, хватает для всего.

Известно, что на рисовом зернышке при всей его видимой малости китайцы ухитряются писать поэмы. А вот на электроны ничего, непосредственно к состоянию электрона не относящегося, записать нельзя. Обогатившись при столкновении сведениями о состоянии партнера, электрон вынужден в известном смысле «забыть себя» и, будучи рассмотрен как отдельный объект, несет на себе печать принципиальной непредсказуемости. Заметим снова, что на бытовом языке у нас для этого разговора не хватает слов, хотя в символической математической формализме тут уже давно все в порядке.

С привлечением перечисленных принципов и на основе развитого аппарата квантовой теории открытых систем получают математическое обоснование законы термодинамики, прозорливо угаданные еще в прошлом столетии. Однако прежняя картина «теплового хаоса» корпускул-молекул приобретает при этом непривычные черты. Прежде механистические представления подсказывали нам идею о разрушительном характере теплового движения. Казалось, что хаотические столкновения необратимо разрушают память о прошлых состояниях физических систем, безвозвратно уничтожают любую информацию.

Теперь же оказывается, что уходит лишь локализованная, индивидуализированная информация, но Вселенная помнит все. Мировая «когерентная» память не только не исчезает, она ежемгновенно обогащается, пока продолжается История. Движение в будущее из прошлого похоже скорее на формирование голограммы, нежели на перестановку каких-то неизменных объектов. Впрочем, как всякая аналогия, и эта, наверное, неточна.

Едва добравшись до разгадок некоторых старых человеческих кроссвордов, мы получили в придачу многоцветие новых захватывающих тайн. Но ведь это-то и хорошо!