



ГЛАВА 8

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Закон сохранения энергии исторически возник в механике. Уже Галилей применял его, но скорее интуитивно, а не как результат наблюдения. Он указывал, что достигнутая при падении скорость тела позволяет ему подняться на первоначальную высоту, но не выше. Гюйгенс обобщил это положение для центра тяжести системы падающих тел. Лейбниц придал этому принципу в 1695 г. такую форму: произведение силы на путь дает увеличение «живой силы» (*vis viva*). Ньютон не придавал этому понятию особого значения. Напротив, Иоганн Бернулли (1667—1748) часто говорит о сохранении живых сил (*conservatio virium vivarum*) и подчеркивает, что при исчезновении живой силы не теряется способность работы, но она только переходит в другую форму. Леонард Эйлер (1707—1783) знал, что при движении материальной точки под влиянием центральной силы живая сила всегда одна и та же, когда точка находится на определенном расстоянии от центра тяжести. К 1800 г. уже было твердо установлено, что в системе материальных точек, между которыми действуют центральные силы, живая сила зависит только от конфигурации и от некоторой функции сил, определяемой этой конфигурацией. Термин «энергия» для живой силы применил в 1807 г. Томас Юнг (1773—1829), а понятие «работа» — в 1826 г. Жан Виктор Понселе (1788—1867).

Затем была установлена невозможность построить чисто механически *perpetuum mobile*. Что это не может

быть достигнуто также никакими другими средствами, было в конце XVIII столетия, пожалуй, всеобщим убеждением; по крайней мере, Французская Академия решила в 1775 г. не принимать больше на рассмотрение мнимых решений этой проблемы. Какой положительный выигрыш получила наука из этого так отрицательно звучащего воззрения, показало, однако, лишь XIX столетие.

Первый, кто поставил в связь теплоту с работой, был Сади Карно, который, однако, ошибочно считал, что теплота есть неизменная по количеству субстанция (гл. 7). Лишь в 1878 г., когда закон сохранения энергии был уже давно признан, была издана забытая статья рано умершего Карно, в которой он отказался от этого ошибочного исходного пункта и без вывода дал вполне правильно механический эквивалент теплоты. На ход истории Карно больше влияния не имел *).

Давно было известно, что при трении тел их температура повышается. Теория, рассматривавшая теплоту как субстанцию, пыталась объяснить этот факт всевозможными гипотезами о трении. Они были опровергнуты Вениамином Томсоном (позднее граф Румфорд, 1753—1814). В 1798 г. он довел до кипения довольно большое количество воды, приводя при помощи лошадей во вращение тупое сверло в канале ствола пушки; теплоемкость металла не испытала изменения, требуемого теорией субстанциональности теплоты. Гемфри Дэви (1778—1829) доказал в 1799 г. то же самое, подвергая посредством часового механизма трению два куска металла под воздушным насосом.

В первые десятилетия после 1800 г. **) можно часто встретиться с идеей, что существует «сила», которая

*) См. об этом P l a n k, Das Prinzip der Erhaltung der Energie, 2. Auflage, Leipzig und Berlin, 1908, S. 17. Русский перевод: Макс Планк, Принцип сохранения энергии, М.—Л., 1938.

**) См. названное сочинение М. Планка, стр. 23 и 24.

выступает, смотря по условиям, в виде движения, химического сродства, электричества, света, теплоты, магнетизма, причем любая из этих форм может превращаться в остальные. Чтобы превратить эту смутную идею в ясное понятие, надо было найти общую меру этой «силы». Шаги в этом направлении предприняли различные исследователи, каждый в своем роде.

Первым был Юлиус Роберт Майер (1814—1878), врач, «умственным направлением которого было скорее философское обобщение, чем эмпирическое построение» *). В своей короткой статье в мае 1842 г. он применяет к «силе падения», к движению и теплоте положения: «Ex nihilo nihil fit» и «Nihil fit ad nihilum». Важным было довольно точное указание механического эквивалента теплоты. Как он пришел к этому, он объяснил, правда, только в 1845 г.; его вычисление представляет собой обычное для нас вычисление из разности обеих удельных теплот идеальных газов на основе допущения независимости энергии газа от его объема, не высказанного явно в работе Майера, но фактически подтвержденного в 1807 г. измерениями Гей-Люссака. Почти то же значение получил в 1843 г. Людвиг Август Колдинг (1815—1888) на основании своих опытов с трением; правда, его обоснование общего закона сохранения нам кажется еще более фантастичным, чем у Майера.

В своем втором сочинении Майер уже рассматривает электрические и биологические процессы; в третьем, относящемся к 1848 г., он занимается вопросом о причине солнечного тепла, объясняет накаливание метеоров потерей ими кинетической энергии в атмосфере и применяет закон сохранения энергии к приливам и отливам. Очевидно, Майер сознавал значение своего открытия. Однако на закон сначала не обращали внимания, и он нашел заслуженное признание гораздо позже.

*) Планк, стр. 23 и 24.

Как бы ни относиться к дедукции Майера, во всяком случае надо признать: поскольку задачей физики является нахождение всеобщих законов природы, а постоянство определенных физических величин является простейшей формой закономерности, то поиски постоянных количеств являются не только правомерным, но в высшей степени важным направлением исследования. Это направление постоянно защищалось в физике. В основном благодаря ему мы уже давно убедились в постоянстве количества электричества. Правда, дать окончательное решение того, действительно ли постоянна принятая величина, может только опыт. Подобно закону сохранения электричества, принцип сохранения энергии является также опытным законом. В своем вычислении механического эквивалента тепла Майер действительно пошел по эмпирическому пути. В отношении других областей физики закон сохранения был для него только программой, провести которую он предоставлял другим.

На втором месте назовем Джемса Прескота Джоуля (1818—1889), который написал в начале 1843 г. статью (появившуюся в печати только в 1846 г.) о термических и химических действиях электрического тока. Посредством измерений он установил то, что позднее по праву было названо его именем: теплота, развивающаяся в замыкающей проволоке гальванического элемента, равна, как теперь говорят, тепловому напряжению (*Wärmelönung*) химической реакции, если нет тока*), и эта теплота уменьшается, если ток совершает работу. Вскоре после этого, в 1845 г., он сообщил результаты измерений механического эквивалента теплоты, полученные при превращении механической работы в теплоту иногда непосредственно, иногда посредством электричества, иногда путем сжатия газов.

*) Это, конечно, справедливо лишь тогда, когда элемент при порождении тока не испытывает температурного изменения и когда нет теплового обмена со средой.

Химический и др. (см. стр. 22)

Герман Гельмгольц (1821—1894) был тем человеком, универсальный ум которого смог полностью охватить универсальное значение закона сохранения энергии. Он пришел к этому принципу от медицины, как и Майер, работ которого он вначале не знал и к результатам исследований которого пришел поэтому независимо от него. В 1845 г. в маленькой статье Гельмгольц правильно установил ошибку знаменитого химика Юстуса Либиха (1803—1873), указав, что нельзя безоговорочно приравнять теплоту сжигания питательных веществ в теле животного теплотам сжигания химических элементов, из которых состоят эти вещества. Одновременно он дал краткий обзор последствий закона для различных областей физики.

Особенно ясное выражение закона Гельмгольц дал в докладе на заседании Берлинского общества физиков 23 июля 1847 г. В противоположность Майеру Гельмгольц признавал, как и большинство его современников, возможность механического объяснения всех явлений природы посредством центральных сил притяжения и отталкивания. Он ошибочно усматривал в нем достаточное и необходимое условие для невозможности *perpetuum mobile*. Но в своих дедукциях он не пользовался этой механистической гипотезой, а выводил различные выражения для энергий непосредственно из принципа невозможности *perpetuum mobile* хотя бы уже потому, что сведение всех явлений к механическим силам не могло быть достигнуто. Поэтому установленные им законы, не связанные с этой ошибочной концепцией, смогли ее пережить. Гельмгольц ввел в механику новое понятие «потенциальной энергии»; он дал также выражения энергии для гравитационных, статических электрических и магнитных полей. Новым являлось также то, что он говорил с энергетической точки зрения о получении токов в гальванических и термических элементах, а также об электродинамике, включая явления индукции. Когда мы теперь вычисляем энергию поля тяготения через произведения масс и потенциалов, энергию электрического поля через произведение

зарядов и потенциалов, мы непосредственно опираемся на работу Гельмгольца.

Мы зашли бы слишком далеко, если бы захотели войти в эти вопросы подробнее; мы не можем также здесь заниматься дальнейшим развитием закона. Упомянем только заключительное определение, которое дал в 1853 г. Вильям Томсон (позднее лорд Кельвин, 1824—1907): «Под энергией материальной системы в определенном состоянии мы понимаем измеренную в механических единицах работы сумму всех действий, которые производятся вне системы, когда она переходит из этого состояния любым способом в произвольно выбранное нулевое состояние». В словах «любым способом» заключается закон природы — закон сохранения энергии.

Рассуждения Гельмгольца 1847 г. не нашли сразу общего признания; его старшие современники боялись возрождения фантазий гегелевской натурфилософии, против которой они давно боролись. Только имеющий большие заслуги в механике математик Густав Якоб Якоби (1804—1851) сразу признал в рассуждениях Гельмгольца законное продолжение хода мыслей тех математиков XVIII столетия, которые преобразовали механику. Но когда около 1860 г. закон сохранения энергии нашел всеобщее признание, он стал, конечно, очень скоро краеугольным камнем всего естествознания.

Особенно в физике отныне рассматривали любую новую теорию прежде всего с той точки зрения, удовлетворяет ли она этому закону. В 1890 г. воодушевление зашло у некоторых ученых, например у выдающегося физико-химика Вильгельма Оствальда (1853—1932), так далеко, что они сделали понятие энергии центральным пунктом мировоззрения («энергетики») или, по крайней мере, стремились вывести из него другие физические законы. Они настолько далеко зашли в своем отрицании второго начала термодинамики, что отрицали различие между обратимыми и необратимыми процессами и, например, переход тепла от более

высокой к более низкой температуре ставили на одну ступень с падением тел в поле тяжести. Планк с незначительным успехом возражал против этого с точки зрения термодинамики. Более действенно возражал Людвиг Больцман с точки зрения атомной теории и статистики. Наконец, «энергетика» исчезла, как многие другие заблуждения, со смертью ее защитников.

Понятие энергии проникло также в технику. Каждая машина оценивается по ее энергетическому балансу, т. е. насколько вложенная энергия превращается в ней в желаемую форму энергии. В наше время это понятие входит в умственный инвентарь каждого образованного человека.

Учение об энергии не завершилось признанием закона сохранения. Оно до нашего времени продолжало развиваться. Гельмгольц вычислил, как было сказано, энергию электростатических и магнитостатических полей из зарядов и потенциалов. Применение фарадеевской идеи близкодействия побудило Максвелла локализовать эту энергию в пространстве и каждому элементу объема приписать определенную ее долю. Джон Генри Пойнтинг (1852—1914) в 1884 г. развил теорию потока энергии для изменяющихся полей, в которых объемные элементы не сохраняют своей доли энергии, совсем так, как будто бы электромагнитная энергия является субстанцией. Г. Ми показал в 1898 г., что можно перенести это представление на упругую энергию; например, через передаточный ремень, соединяющий паровую машину с рабочей машиной, идет поток энергии противоположно его движению, и когда вместо ремня устанавливают приводной вал, тогда энергия течет параллельно оси вала. Сюда присоединяется расширение Планком (1908) эйнштейновского закона инертности энергии (гл. 2 и 6): с любым потоком энергии связан импульс (в смысле механики). Плотность

импульса, т. е. импульс в единице объема, получается делением плотности потока энергии на квадрат скорости света. В действительности это уже было известно из опыта, впервые проведенного в 1901 г. Петром Лебедевым (1866—1912), относительно давления, оказываемого на тела светом или другими электромагнитными волнами. Именно свет несет импульс. Впрочем, этот закон установили уже в 1900 г. Анри Пуанкаре (1854—1912), Г. А. Лорентц (1853—1928) и другие, ограничиваясь только электромагнитной энергией.

В ньютоновской механике кинетическая энергия играет особую роль; она присоединяется к каждому другому виду энергии как следствие движения. Согласно теории относительности эта особая форма энергии отпадает. Вместо этого любой вид энергии умножается на множитель, зависящий от скорости. Это существенное изменение в наших воззрениях тесно связано с законом инертности энергии; получился бы порочный круг, если бы мы хотели, с одной стороны, свести какую-либо форму энергии к инерции тел и, с другой стороны, инерцию свести к энергии.

Чаще применяют закон инертности энергии в следующей форме: масса тела равна его энергии (в состоянии покоя), разделенной на квадрат скорости света. Сообразно с этим ограничивается значение закона сохранения массы. Получение теплоты или работы, например при сжатии тела, увеличивает его массу; отдача тепла или работы уменьшает ее. Химические реакции, поскольку они протекают с выделением тепла, уменьшают общую массу участников реакции, правда настолько мало, что это уменьшение не поддается даже точнейшему взвешиванию. Поэтому Ландольт (гл. 2) не мог его установить. Но при превращении атомных ядер освобождаются количества энергии, очень

большие по сравнению с массами. Они играют в учении об ядерных превращениях очень существенную роль (гл. 11).

Закон инертности энергии заполняет пробел, который еще имелся в вышеприведенном определении энергии. За нулевую точку энергии принимается произвольно выбранное состояние. Но если сводят любую инертную массу к энергии, то и та, и другая определяются без подобного произвола. Что это сведение соответствует природе, внушительно доказывается тем фактом, что электрон и позитрон могут целиком превращаться в энергию излучения (гл. 14).

Если отвлечься от энергии приливов и отливов, то вся энергия, используемая на Земле до последних лет, возникла, в конечном счете, из солнечного излучения. С открытием закона сохранения энергии поэтому остро встал вопрос о происхождении энергии, постоянно излучаемой Солнцем и звездами. Мысль Майера о сведении этой энергии к кинетической энергии метеоритов, постоянно падающих на эти большие тела, оказалась при ближайшем рассмотрении недостаточной. Гельмгольц указал в 1854 г. на гравитационную энергию той большой шаровой туманности, из которой, согласно космогонии Канта—Лапласа, образовались путем уплотнения Солнце и звезды, — процесс, который в действительности должен превращать эту энергию в другие формы.

Но и этот запас энергии также недостаточен для излучения звезд, пасчитывающих продолжительность жизни в миллиарды лет. Лишь физика атомного ядра (гл. 11) дала нам знание достаточно мощного источника энергии. Высокие температуры внутри звезд делают возможными ядерные реакции, которые мы получаем обычно только в лаборатории с электрически ускоренными частицами. В 1938—1939 гг. К. Ф. Вейцекер и Г. А. Бете показали, что вероят-

ный механизм порождения энергии в звездах состоит в образовании ядер гелия путем соединения элементарных частиц. Это происходит, правда, не непосредственно, но через ряд промежуточных хорошо известных ядерных реакций. Теперь человечество в состоянии, хотя пока еще в скромной степени, пользоваться атомными превращениями как источником энергии непосредственно, а не окольным путем через солнечное излучение (гл. 11).

