

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ
ИНЕРЦИЯ И ЭНЕРГИЯ*)

М. Лауэ

I. ВВЕДЕНИЕ

В современной физике законы сохранения имеют фундаментальное значение. Существенны три из них: принцип инерции, который утверждает сохранение линейного импульса, принцип энергии, который говорит о сохранении энергии, и закон сохранения количества электричества. Есть еще два закона сохранения, касающиеся сохранения вращательного импульса и инертной массы. Первый из этих двух законов является необходимым следствием закона сохранения линейного импульса, а второй, постольку поскольку мы еще принимаем его справедливость, стал тождественным с законом сохранения энергии. Наконец, законы сохранения линейного импульса и энергии тоже слились в современном релятивистском представлении в один закон. Последующая дискуссия посвящена именно такому объединению первоначально совершенно различных законов.

Сначала рассмотрим закон сохранения количества электричества. Историю этого закона можно рассказать очень быстро, хотя она насчитывает уже более века. Под мощным влиянием закона всемирного тяготения Ньютона аналогичный закон на заре XVIII в. был постулирован для электрического притяжения и отталкивания. Сохранение массы, в которое верили с должным основанием, было просто перенесено на электрический «флюид», с единственным изменением, состоявшим в том, что положительные и отрицательные заряды взаимно уничтожают друг друга. Несколько исследователей вывели обратную пропорциональность взаимодействия квадрату расстояния задолго до Кулона, на основании экранирующего действия электрически проводящей оболочки. Даже сам Кулон ссылается на это явление в своей работе, описывающей знаменитый эксперимент с крутильными весами, как на второе доказательство этого закона. Однако лишь немногие смогли понять этот аргумент в то время, и он был забыт. Пропорциональность между силами и зарядами была безоговорочно принята всеми учеными того времени. Они не могли доказать справедливость этого закона и именно по той причине, что они не имели в своем распоряжении хорошо определенной количественной меры заряда. Идея определения количества электричества из самого закона Кулона принадлежала

*) Серия «The Library of Living Philosophers», т. VII, Albert Einstein Philosopher-Scientist, стр. 503—533. В конце упомянутой книги содержится небольшая статья А. Эйнштейна «Ответы на критику», в которой имеется следующий отзыв об этой статье: «Это исследование, по моему мнению, имеет непреходящее значение. Я думаю, что следовало бы сделать эту статью легко доступной для студентов, выпустив отдельным изданием». Перевод В. А. Угарова.

Гауссу (около 1840 г.). Экспериментальное доказательство сохранения заряда было впервые получено Фарадеем в 1843 г. в его опыте с ведром для льда.

Устройство состояло из металлического сосуда с относительно малым отверстием — ведра для льда. Этот сосуд был соединен с электрометром и вместе с ним изолирован от других тел. Фарадей опускал в этот сосуд электрически заряженное тело, подвешенное на изолирующей нити; немедленно электрометр показывал отклонение, пропорциональное заряду. И это отклонение оставалось неизменным независимо от того, что делалось с зарядом внутри ведра для льда, например передавался ли он стенке или же он добавлялся к другим зарядам, имевшимся до начала эксперимента, и которые, возможно, могли компенсировать новый заряд. Возможно, что это доказательство не чересчур строго. Но как составная часть максвелловской теории электричества закон сохранения заряда опирается на многочисленные точные экспериментальные подтверждения теории. В настоящее время по поводу этого закона никаких сомнений нет.

Этот фундаментальный результат никогда не вызывал даже приблизительно такого же впечатления, какое было вызвано законом сохранения энергии, доказанным приблизительно в то же самое время. История физики позволяет нам понять причины такого различия. Целые поколения ученых боролись за утверждение закона сохранения энергии, но сохранение количества электричества было *«communis opinio»* (общим убеждением) уже за сто лет до Фарадея.

Далее мы расскажем значительно более богатую событиями историю двух остальных законов сохранения и их внутренние взаимоотношения.

II. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА В МЕХАНИКЕ НЬЮТОНА

Закон сохранения импульса и закон сохранения энергии являются достижениями современности. Закон сохранения импульса нужно, по-видимому, считать более ранним, потому что он был ясно сформулирован и его значение раскрыто раньше, чем это было с законом сохранения энергии, даже если ограничивать применение закона сохранения энергии одной механикой. Справедливости ради надо указать, что античность оставила нам основные знания, касающиеся статики, непреходящего значения; науку о механическом равновесии. Но под влиянием доктрин Аристотеля в античности отстаивались воззрения, диаметрально противоположные принципу инерции, а именно утверждалось, что для того, чтобы поддерживать любое движение, необходимо непрерывное действие извне. Так продолжалось до времен Галилея (1564—1642), когда этот блестящий основоположник теории движения, динамики, за свою долгую жизнь исследователя сумел понять, что движение тела, свободного от внешнего воздействия, вовсе не прекращается, а продолжается неограниченно долго с постоянной скоростью. Стоит отметить, что те рассуждения, которые привели его к этому результату, были основаны на энергетическом рассмотрении в нашем современном понимании.

Эти рассуждения состояли в следующем: тело на поверхности Земли, падающее с определенной высоты, будь это прямое падение, движение по наклонной плоскости, круговое движение маятника или какое-либо другое, должно приобретать именно ту скорость, которая необходима телу, чтобы вернуться на исходный уровень; потому что любое отклонение от этого закона дает способ подъема тела с помощью действующей на него самой силы тяжести, например обращением процесса движения, поскольку такое обращение всегда возможно; Галилей считал, что это невозможно. Более того, он подкрепил свои мысли несколькими экспериментами.

Пусть тело вновь поднимается по наклонной плоскости, после того как оно падало некоторое расстояние. Чем меньше наклон плоскости к горизонтали, тем длиннее путь, который требуется, чтобы достичь прежний уровень на наклонной плоскости. А если плоскость горизонтальна, то тело будет продолжать движение (по плоскости) на бесконечность с уменьшающейся скоростью.

Такой переход к пределу не проводился в работах Галилея явно, так как этот последовательный эмпирик знал, что плоскость не является поверхностью уровня по той причине, что Земля имеет сферическую форму, и он преднамеренно избегал всяких гипотез, касающихся таких условий, какие могут встретиться где-либо на значительном удалении от Земли. Но читатель его *Discorsi* о механике (1638) не нуждался в том, чтобы ему подчеркивали этот вывод. Таким образом, простейшая форма закона инерции именно то, что скорость всякого тела, на которое не действуют силы, сохраняется и по величине и по направлению, стала общим достоянием всех ученых уже со времен Галилея.

Вскоре было обнаружено, что в законе инерции скрыт более общий закон, проявляющийся при взаимодействии двух тел. При этом в качестве наиболее простого способа взаимодействия рассматривались столкновения; это вызвало к жизни задолго до Ньютона многочисленные теории столкновений. Немногие из них опирались на точные опыты, но все они признавали, что при столкновениях существенную роль играют массы соударяющихся тел, причем массы этих тел просто отождествлялись с их весом. Поскольку взвешивание никогда не обнаруживает изменений в весе тел, масса также считалась постоянной. Этот важный шаг был сделан, очевидно, без всяких опасений, как сам собой разумеющийся. Все ранние теории соударений рассматривали только центральный удар двух шаров, когда движения происходят на одной прямой (соединяющей центры шаров).

Комбинируя массу m и скорость q , уже Декарт (1596—1650) ввел «к о л и ч е с т в о д в и ж е н и я mq » и утверждал, что сумма количеств движения всех тел сохраняется, в частности, сохраняется для двух соударяющихся тел; его рассуждения опирались на философско-теологические рассуждения, которые для нас представляются довольно странными. Вместе с тем, он рассматривал скорость просто как число—по нашей терминологии как скалярную величину—без учета ее направления, т. е. без учета ее векторных свойств. Таким образом, такое рассмотрение естественно не привело к правильным результатам.

В 1668 г. Королевское общество в Лондоне выдвинуло теорию столкновений в качестве темы для конкурса. На конкурс были представлены три работы. Первый кандидат, Джон Валлис (1616—1703), хорошо известный в математике по «формуле Валлиса», отметил, что когда составляется выражение для вышеупомянутого количества движения, противоположно направленным скоростям должны приписываться различные знаки. В остальном он сохранил картезианскую идею постоянства количества движения; конечно, он не смог определить оба импульса после соударения (рассматриваемого им как неупругое) по начальным скоростям с помощью только этого единственного условия; он, однако, ввел некоторые дополнительные предположения, которые оказались неправильными, и сделали его результат ошибочным.

Христиан Гюйгенс (1629—1695) сначала представил в Королевское общество только окончательный результат, а доказательство было опубликовано позже в статье (*De motu corporum ex percussione*), напечатанной в его книге *Opuscula posthuma* (1703). Он совершенно верно указал, что не только сумма (взятая с верными знаками) количеств движения mq имеет одно и то же значение до и после абсолютно упругого столкновения, но

также, что и сумма произведений соответствующих масс m на квадраты их скоростей mq^2 до и после соударения постоянна. Эти два соотношения фактически обеспечивают решение задачи полностью. В этом случае мы сталкиваемся с первым применением принципа механической энергии, хотя и без малейшего представления о его всеобъемлющем значении. Кстати, Кристоф Рен (1623—1723), третий кандидат, использовал этот же самый принцип аналогичным образом. Очень интересно, однако, что в этой же статье Гюйгенс использовал принцип относительности, конечно, принцип относительности, соответствующий только механике своего времени, который теперь мы называем принципом относительности Галилея, в отличие от принципа относительности Эйнштейна. Для того чтобы обобщить закон, утверждающий, что два одинаковых упругих шара со скоростями, равными по величине и противоположными по знаку, при соударении просто обмениваются своими скоростями, Гюйгенс предположил, что столкновение происходит на движущемся корабле, а наблюдение производится с берега. Тем самым он осуществил, с точки зрения современной терминологии, преобразование от одной системы отсчета к другой.

Но все эти исследования оказались сразу устаревшими, когда Исаак Ньютон (1642—1727) опубликовал свою книгу «Principia» (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*) в 1687 г. В этом трактате мы находим два утверждения, во-первых, что скорость изменения (линейного) импульса точечной массы, отнесенная к единице времени, равна силе, действующей на эту массу, и, во-вторых, что силы, действующие между двумя точечными массами, равны по величине и противоположны по направлению (равенство действия и противодействия). Отсюда непосредственно следовало, что взаимодействие произвольного числа точечных масс никогда не изменяет их полный импульс, и что этот полный импульс остается постоянным для любой системы, не подверженной действию внешних сил. Ньютон рассчитывал полный импульс, как векторную величину, векторно складывая отдельные моменты. Его формулировка второго закона, упомянутая выше, оказалась почти пророческой: он приравнивал силу не произведению массы на ускорение, а скорости изменения импульса, хотя обе эти формулировки вполне эквивалентны, если предположить, что импульс равен произведению mq . Ньютоновская формулировка, тем не менее, согласуется с представлениями современной теорией относительности, тогда как иные формулировки были опровергнуты экспериментами по отклонению быстрых электронов.

Механика Ньютона получила свое главное эмпирическое подтверждение на астрономических объектах, потому что Ньютону удалось на ее основе совместно с его же законом всемирного тяготения математически получить законы движения планет. Но все остальные великие идеи его работы (теория приливов, расчет уплощения Земли и других планет, получение выражения для скорости звука и т. д.) подкрепляли уверенность в справедливости закона импульсов—поскольку они подтверждались на опыте—потому что все они были основаны на этом законе. В последующие столетия тысячекратные эмпирические подтверждения ньютоновской механики создали почти безграничную веру в справедливость закона импульсов. В умах многих ученых этот закон приобрел свойства математической истины, которой он, конечно, не является.

Сохранение вращательного импульса является одним из наиболее важных математических следствий закона линейного импульса; вращательный импульс является направленной величиной (вектором), которая определяется импульсом точечной массы и радиусом-вектором, проведенным к этой точке от некоторой фиксированной точки пространства. Вращательный момент перпендикулярен к этим двум векторам, его величина

получается умножением слагающей импульса, нормальной радиусу-вектору, на длину радиуса-вектора. Наиболее ранними примерами использования сохранения вращательного момента были два закона Кеплера, которые утверждали, что, во-первых, все траектории планет являются плоскими и что, во-вторых, радиусы-векторы, проведенные от Солнца к планетам, описывают равные площади в равные времена. Позже закон сохранения вращательного момента получил широкую известность, когда в 1765 г. Леонард Эйлер (1707—1783) с помощью аналитических методов развил теорию вращения твердого тела около закрепленной точки; далее, несколько позже (1834), Луи Пуансо (1777—1859) решил ту же самую задачу с помощью синтетически-геометрического метода. Все, что требуется в данном случае — это лишь использование и математическая интерпретация закона сохранения вращательного импульса. Волчок дает очевидный пример движения такого типа, которое может быть рассмотрено с помощью этого закона. Когда у твердого тела не фиксируется ни одна точка, тогда поступательное движение его центра масс определяется исключительно законом линейного импульса, а вращение около этой точки только законом вращательного импульса.

Как ф и з и ч е с к а я проблема механика была полностью разрешена Ньютоном. Математики, тем не менее, разрабатывали ее в течение последующих полутора столетий. Они воздвигли строение с такой архитектурной красотой, какую сам Ньютон никогда и не предполагал. Остается фактом то, что архитекторами были математики и что они совсем не нуждались в новых экспериментах или каких-либо наблюдениях, служащих для доказательства того, что основы, заложенные Ньютоном, были вполне достаточны, чтобы держать на себе все строение. И так как ученые того времени предполагали свести всю физику к механике, то они думали, что эти основы будут достаточными, чтобы выдержать также и значительно большее здание физики. Эта вера вдохновляла физические изыскания вплоть до конца XIX в. Лишь в это время новые идеи получили преобладание как в механике, так и во всех остальных разделах физики.

Ньютоновская механика предполагает действие на расстоянии между различными телами. Закон всемирного тяготения Ньютона указывает на это вполне отчетливо. Не очень существенно, рассматривал ли сам Ньютон этот закон как нечто большее, чем определенная аппроксимация, которая в конечном счете должна быть заменена законом, включающим в себя конечную скорость распространения взаимодействий. Представление о твердом теле, у которого любая сила, действующая на какую-либо его часть, немедленно передается на все тело, также основано на идее действия на расстоянии. Более фундаментально аксиома равенства действия и противодействия подчеркивает важность действия на расстоянии в теории Ньютона: в случае, когда тело *A* является источником действия, которое меняет его импульс и которое т о л ь к о п о з ж е достигает тела *B*, где оно вызывает равное, но противоположное по знаку изменение импульса, сумма импульсов обоих тел, очевидно, в течение времени передачи действия не такая, как до и после передачи. В последнем разделе статьи мы покажем, как физики могут сохранить закон сохранения импульса за счет расширения понятия импульса.

Мы хотим закончить этот раздел замечанием, касающимся неизменности массы. Как это было уже упомянуто, такая неизменность считалась доказанной тем, что повторные взвешивания никогда не указывали на какие-либо изменения в весе тела. После революционных открытий в химии в XVIII и XIX вв. встал вопрос о том, оставляют ли химические реакции полный вес вещества неизменным. Ганс Ландольт (1831—1910) достиг высочайшей точности при соответствующих весовых определениях для

пятнадцати различных реакций в большой серии опытов, которые длились с 1893 по 1909 г. Он был бы в состоянии заметить относительные вариации в весе, большие чем 10^{-6} . В небольшом числе случаев он получил даже большую точность.

III. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

В механике начало освоения закона сохранения энергии совпадает с моментом установления закона сохранения импульса, как это показывает рассмотренное выше энергетическое рассмотрение, сделанное Галилеем и Гюйгенсом. Ньютоновская теория планетарного движения естественно подразумевала тот факт, что планета всегда имеет ту же самую скорость, возвращаясь в точку, находящуюся на определенном расстоянии от Солнца. Для Ньютона, однако, это обстоятельство было лишь одним из многочисленных следствий закона сохранения импульса. Готфрид Вильгельм Лейбниц (1646—1716) был первым, кто обратил внимание на произведение массы на квадрат скорости mq^2 . В 1695 г. он назвал это выражение «*Vis viva*» (живая сила), и этот термин использовался вплоть до середины XIX в. Следуя Густаву Гаспару Кориолису (1792—1843), его прилагали к половине mq^2 , к значению $\left(\frac{m}{2}\right)q^2$. Иоганн Бернулли (1667—1748) ввел термин «энергия», но это название в течение некоторого времени не получило широкого распространения. Мы применяем слово «энергия» в настоящее время в более широком смысле, а «*vis viva*» называем «кинетической энергией». Кинетическая энергия впервые привлекла публичное внимание во время хорошо известного бесконечного спора между картезианцами, с одной стороны, и Лейбницем и его учениками, с другой, по поводу того, что представляет собой правильную меру силы— mq или mq^2 . Фактически обе величины играют в механике очень важную, но совершенно разную роль; вся дискуссия имела дело с фиктивной проблемой, вызванной неясностью в понимании слова «сила» (*vis*). В XVIII в., однако, представление о силе было еще столь тесно переплетено с мистикой, что даже очень серьезные мыслители участвовали в этом диспуте.

Следующий шаг в интерпретации закона энергии был сделан уже упомянутым швейцарским математиком Иоганном Бернулли и Леонардом Эйлером. Они подчеркивали, что изменение кинетической энергии замкнутой механической системы вовсе не является результатом уменьшения ее «способности к действию» (*Facultas agendi*), но есть просто переход этой энергии в иные формы. В 1826 г. Жан Виктор Понселе (1788—1867) впервые вводит понятие «работа» для произведения силы на путь, пройденный точкой ее приложения: в механике работа равна изменению энергии. Кинетическая энергия снова приобретает важнейшее значение в работе о соударениях, выполненной Томасом Юнгом (1773—1829) и опубликованной в 1807 г. В качестве одного из выводов механики к концу XVIII в. было установлено, что невозможно сконструировать из механических элементов *perpetuum mobile*, т. е. машину, которая могла бы непрерывно производить механическую работу из ничего. То, что этот результат может иметь более общее значение, по-видимому, подозревалось уже тогда; по крайней мере в 1775 г. Парижская Академия решила не принимать на рассмотрение никаких новых решений проблемы *perpetuum mobile* на том основании, что на изучение таких схем уже бесплодно израсходовано слишком много времени. То, что эти отрицательные результаты могут привести к важнейшим положительным заключениям, осталось в то время неосознанным.

Стимулом для обобщения закона сохранения энергии и распространения его из области механики до всеобщего закона сохранения послужил

давно известный факт, что тогда, когда теряется кинетическая энергия или механическая работа, посредством трения повышается температура участвующих в явлении тел, а также полученный значительно позднее из наблюдений над паровой машиной факт, состоящий в том, что в результате теплового процесса можно получить работу. И именно в связи с паровой машиной, которой заинтересовался в 1824 г. Сади Карно (1796—1832), в его замечательной работе был получен фундаментальный вывод о том, что получение работы зависит от условий перехода тепла от бойлера высокой температуры к окружающей среде, имеющей более низкую температуру. Его работа была, однако, безнадежно испорчена ошибочным убеждением в том, что поток, т. е. тепло, представляет собой некое неразрушимое вещество. Его последователь Бенуа Клапейрон (1799—1864) все еще держался за эту ошибку в своей работе 1843 г. Но даже задолго до этого, в первых десятилетиях XIX в., раздавались голоса, которые утверждали существование некоторой единообразной «силы», которая в равной степени ответственна за тепловые, световые, электрические, магнитные явления, химическое сродство и т. д. Ко всему этому следует добавить многочисленные дискуссии об обмене веществ при питании организма как источнике животного тепла и способности производить работу. Открытие носилось в воздухе и сразу несколько ученых независимо сделали существенный шаг в его направлении.

Первым был Юлиус Роберт Майер (1814—1878), врач, который (цитирую работу Планка¹ о сохранении энергии, написанную в 1885 г.) «предпочел, всем устремлением своего мышления, обобщение в философском духе обрывочным построениям экспериментального толка». В небольшой статье, появившейся в мае 1842 г., он применяет принципы «*Ex nihilo nihil fit*» (из ничего образуется только ничего) и «*Nil fit ad nihilum*» (ничего ведет к ничему), прилагая эти принципы к «силе падения», движению и теплоте; что составляет непреходящую ценность в его статье, так это то, что он дает в разумных пределах правильное значение для механического эквивалента тепла. Как он получил это значение, об этом он не рассказывает вплоть до 1845 г.; его вычисления сделались сейчас уже привычными — по разности двух удельных теплоемкостей идеальных газов, — причем он сделал неявное, но правильное, предположение о том, что внутренняя энергия идеальных газов не зависит от объема. Людвиг Август Кольдинг (1815—1888) получил почти в точности то же самое значение в 1843 г. из экспериментов, существенную роль в которых играло трение; но во всяком случае его обоснования общего закона сохранения представляются нам куда более фантастическими, чем рассуждения Майера. Последний уже в своей второй публикации рассматривал биологические и электрические процессы, тогда как в третьей, в 1848 г., он поднимает вопрос об источниках солнечного тепла, объясняет нагрев метеоров потерей ими кинетической энергии в атмосфере и прилагает закон сохранения энергии к теории приливов. Совершенно очевидно, что Майер полностью понимал значение своего открытия; тем не менее он оставался долгое время в полной неизвестности и заслуженное признание получил лишь значительно позднее. Люди, подобные Джоулю и Гельмгольцу, не должны осуждаться за то, что они не узнали сразу о разбросанных по разным местам работах Майера, и поэтому не могли на него ссылаться.

Что бы мы ни думали об аргументах Майера, мы во всяком случае должны принять следующее: поскольку задачей физики является установление общих законов природы и поскольку простейшей формой общего закона является утверждение о сохранении некоторой частной величины, поиски сохраняющихся величин являются не только вполне оправданным направлением научного исследования, но и чрезвычайно важным направ-

лением. Такой подход всегда существовал в физике. Такому подходу мы обязаны старому убеждению, касающемуся постоянства электрического заряда. Окончательное решение, действительно ли некоторая величина, которой приписывается некоторый закон сохранения, обладает этим свойством, конечно, достигается опытным путем. Принцип сохранения энергии в такой же мере экспериментальный закон, как и закон сохранения электричества. Но Майер фактически встал на путь экспериментирования, определяя механический эквивалент тепла. Для других областей физики принцип сохранения энергии оставался для него лишь программой, которую должны были осуществлять другие.

Вторым человеком, вклад которого мы должны отметить, является Джеймс Прескотт Джоуль (1818—1889), который в начале 1843 г. написал статью о тепловых и химических действиях электрического тока (эта статья не была напечатана вплоть до 1846 г.). Он установил путем измерений, что тепло, получаемое в электрической цепи гальванического элемента (которое впоследствии вполне заслуженно стало называться джоулевым теплом), эквивалентно теплоте химической реакции, если реакция происходит в незамкнутом элементе и при том условии, как это мы должны добавить сегодня, что создание тока элементом происходит без выделения тепла. Вскоре после этого (и снова в 1845 г.) Джоуль описывает определение механического эквивалента теплоты, при котором он превращает механическую работу в теплоту либо непосредственно, либо электрическим путем или посредством сжатия газов.

Человеком, чей энциклопедически образованный ум дал ему возможность развить принцип энергии со всеми его следствиями, был Герман Людвиг Фердинанд фон Гельмгольц (1821—1894). Подобно Майеру, работ которого Гельмгольц не знал и чьи результаты он должен был получить независимо, он подошел к этому принципу, начав с медицинских исследований. В 1845 г. он исправил в небольшой заметке ошибку Юстуса фон Либига (1803—1873), указав на то, что нельзя просто приравнивать тепло сгорания материала пищи в теле животного теплу сгорания составляющих его химических элементов; в то же самое время он дал краткий очерк, выясняющий значение принципа сохранения энергии для различных областей физики.

В своей лекции, произнесенной перед Берлинским физическим обществом 27 июля 1847 г., он идет дальше по направлению расширения своей идеи. В отличие от Майера, Гельмгольц встал на ту точку зрения, что общий характер всех процессов в природе является механическим и может быть понят при допущении наличия центральных сил притяжения и отталкивания, как это и считало большинство его современников. В этой точке зрения он видел достаточное и (ошибочно) необходимое условие, которое определяет невозможность *perpetuum mobile*. Но в своих выводах он не пользовался никакими механическими гипотезами вообще, а получал различные выражения для энергии непосредственно из утверждения о невозможности *perpetuum mobile*, едва ли не по той причине, что свести все процессы к действию центральных сил никоим образом нельзя. Таким образом, его результаты ни в какой степени не зависят от его механистических гипотез, и поэтому смогли пережить их. Среди его оригинальных представлений находится введение понятия о потенциальной энергии («Spannkraft» — stress) в механике, получение выражения для энергии в поле тяготения, энергии в электрическом и магнитном поле и энергетическое рассмотрение, примененное им к образованию электрического тока в гальванических элементах и термоэлементах, а также в электродинамике вообще, включая сюда и электромагнитную индукцию. Когда сегодня мы подсчитываем энергию гравитационного поля в виде произве-

дения массы на потенциал и энергию электрического поля в виде произведения заряда на потенциал, мы совершенно непосредственно применяем метод Гельмгольца.

Если бы мы захотели вдаваться в подробности, то это завело бы нас слишком далеко. Дальнейшее развитие принципа также не может быть здесь рассмотрено. Можно привести лишь окончательную формулировку, которой мы обязаны Вильяму Томсону (позже лорд Кельвин, 1824—1907): «мы принимаем в качестве энергии материальной системы, находящейся в определенном состоянии, вклад всех действий (измеренный в механических единицах работы), производимых вне этой системы, при произвольном переходе из этого состояния в некоторое эталонное состояние, которое может быть определено *ad hoc*». Слово «произвольный» содержит в себе физический закон сохранения энергии.

Рассуждения Гельмгольца отнюдь не всеми были приняты положительно; старшие из его современников были испуганы возрождением фантазий натуральной философии Гегеля, против которых они боролись столь долгое время. И лишь математик Густав Якоб Якоби (1804—1851), который сам сделал немаловажный вклад в механику, сумел увидеть в них логическое продолжение идей тех математиков XVIII в., которые создали механику как науку. Когда же, в конце концов, около 1860 г. закон сохранения энергии получил всеобщее признание, он сделался весьма быстро краеугольным камнем всего естествознания. Теперь всякая новая теория, особенно физическая теория, оценивалась прежде всего с точки зрения ее соответствия с законом сохранения энергии. Около 1890 г. многие ученые, в том числе хорошо известный физико-химик Вильгельм Оствальд (1859—1932), были столь увлечены этим законом, что они не только пытались вывести из него все законы природы, но и сделали его основным положением нового мировоззрения (*Weltanschauung*) — энергетике. Этим преувеличениям, однако, весьма быстро был положен конец менее восторженными современниками.

Идея о сохранении энергии проникла также и к инженерам. О каждой машине стали судить по балансу энергии в ней, т. е. по той степени, в которой вводимая энергия преобразуется в желаемую форму энергии. В наши дни представление о сохранении энергии составляет рабочий багаж всякого образованного человека. Только по отношению к атомной физике, около 1924 г., возникли серьезные сомнения в справедливости принципа сохранения энергии. Некоторое время Бор, Крамерс и Слетер считали, что энергия не сохраняется в индивидуальных актах рассеяния, в которых участвуют рентгеновские или γ -лучи, а сохраняется в среднем для большого числа таких актов. Однако в 1925 г. знаменитые эксперименты, выполненные аналогичным путем Гансом Гейгером (1882—1945) и Вальтером Боте, показали несостоятельность этой точки зрения.

В эпоху энергетике была также выдвинута задача построения механики исключительно на основе принципа сохранения энергии. Мы должны сформулировать здесь ответ на эту постановку вопроса, потому что этот ответ сохраняется и для современной релятивистской механики, хотя сначала он был дан на основе механики Ньютона. Закон сохранения импульса не может быть выведен только из принципа сохранения энергии; в принципе сохранения энергии заложено значительно больше. Но если к нему добавить принцип относительности, пока, конечно, только принцип относительности Галилея, утверждающий, что существует отнюдь не единственная система отсчета, в которой справедливы основные уравнения механики, а что таких систем бесконечное множество, причем все эти системы движутся друг относительно друга с постоянной скоростью (другими словами, если мы потребуем, чтобы сумма потенциальной и кинетической

энергии сохранялась в каждой системе отсчета такого рода), тогда с необходимостью вытекает, что полный импульс рассматриваемой замкнутой системы остается постоянным*). Связь между этими двумя законами сохранения, которая тем самым обнаруживается, имеет прямое отношение к инерции энергии; этой теме как раз и посвящена вся наша статья.

Но когда выяснилось, что принцип сохранения энергии может быть распространен за пределы механики, то вначале казалось, что эта связь полностью потеряна. Принцип сохранения энергии следовало считать значительно более всеобъемлющим, чем чисто механический закон сохранения импульса. Как закон сохранения импульса также постепенно вышел за сферу механики — об этом мы попытаемся рассказать в следующем разделе.

IV. ТЕОРИЯ ПОТОКА ЭНЕРГИИ

Времена менялись, физические знания становились более глубокими. Не существует резкой линии раздела между эпохой, которая окончилась триумфом принципа сохранения энергии, и последующим периодом, который характеризуется тем, что на смену теориям дальнего действия пришла теория близкого действия, гораздо больше соответствующая принципу причинности. Наши сведения отчетливо показывают, что переход был постепенным и что две эти эпохи частично перекрываются. Принцип близкого действия и утверждение о конечности скорости распространения взаимодействий даже в вакууме, тесно связанное с этим принципом, впервые получил признание в электродинамике; мы полностью убедились в этом с той поры, когда Генрих Герц (1855—1894) обнаружил существование электромагнитных волн в 1888 г. Теперь мы также твердо уверены в том, что тяготение распространяется со скоростью света. Эта уверенность, однако, появилась вовсе не на основе новых опытных данных или новых наблюдений, она является исключительно результатом теории относительности. Но это произошло уже несколько позже.

Разумеется, идея близкого действия во всех областях, заполненных веществом, была известна физикам и раньше. Старейшая теория, включающая в себя близкое действие, появилась при рассмотрении упругодеформируемых тел, включая сюда и гидродинамику. Возникновение этой теории нисходит ко временам Ньютона. Тогда подсчитывалась без труда

*) Рассмотрим изолированную систему, состоящую из произвольного количества точечных масс m_i , имеющих скорости \mathbf{q}_i относительно первой системы отсчета, с потенциальной энергией, зависящей от относительных координат m_i , которую мы обозначим Φ . По закону сохранения энергии мы имеем

$$\frac{1}{2} \sum m_i q_i^2 + \Phi = C,$$

где C — не зависящая от времени постоянная.

Во второй системе отсчета, которая движется с постоянной скоростью \mathbf{v} относительно первой системы, те же точечные массы m_i обладают скоростью $\mathbf{q}_i - \mathbf{v}$. Относительно этой системы закон сохранения энергии примет вид

$$\frac{1}{2} \sum m_i (\mathbf{q}_i - \mathbf{v})^2 + \Phi = C',$$

где C — опять-таки не зависит от времени; Φ имеет в обоих случаях то же самое значение. Вычитая первое уравнение из второго, получим

$$\frac{1}{2} v^2 \sum m_i - \left(\mathbf{v} \sum m_i \mathbf{q}_i \right) = C' - C.$$

Согласно этому уравнению, скалярное произведение $(\mathbf{v} \sum m_i \mathbf{q}_i)$ не зависит от времени, независимо от величины и направления скорости \mathbf{v} . А это возможно лишь в том случае, когда $\sum m_i \mathbf{q}_i$, полный импульс всех точечных масс, является постоянным во времени.

не только полная потенциальная энергия деформированного тела, но уже считалось, что потенциальная энергия должна быть локализована, другими словами, каждой части тела могла быть приписана ее определенная часть. Было общепризнано также, что жидкость, движущаяся под давлением, не только передает энергию за счет переноса, но также несет с собой дополнительное количество энергии, пропорциональное ее скорости и давлению. В 1898 г. эта теория была завершена Густавом Ми, который указал способ расчета потока энергии для любого движения упруго-деформированных тел. Представление о том, что энергия течет как вещество, может быть проведено в совершенно общем виде². В приводном ремне, связывающем мотор с машиной, потребляющей энергию, энергия течет против движения по растянутой половине ремня. По вращающемуся и закрученному валу, связывающему судовую машину с винтом, энергия течет параллельно оси вала, т. е. под прямым углом к скорости материальных частиц.

Метод Гельмгольца для электромагнитных процессов вначале просто определял выражение для полной энергии; постольку, поскольку верили в действие на расстоянии без участия какой-либо промежуточной среды, вопрос о локализации энергии смысла не имел. Но Михаил Фарадей (1791—1867), в ходе своей длительной научной карьеры, развил представление о поле как о среде, передающей такое действие; поле рассматривалось как изменение физического состояния системы, которая в своей существенной части локализована в диэлектрике или даже в пустом пространстве между носителями электрических зарядов и электрических токов, а также между магнитами. При таком подходе к делу вопрос о локализации энергии приобрел смысл; максвелловская теория электричества и магнетизма, выдвинутая в 1862 г., уже фактически содержала выражения для подсчета плотности энергии, которые были аддитивно составлены из членов, соответствующих электрическому и магнитному полям. Такие выражения являлись необходимым дополнением полевых представлений.

Пойнтинг (1852—1914) сделал дальнейший шаг в теории, добавив к ней в 1884 г. представление о потоке электромагнитной энергии, задолго до того, как Ми провел эту мысль в применении к теории упругости. Он начал этот шаг, исследуя полученное им математическое следствие уравнений Максвелла, а завершил его значительно большим: введением совершенно нового физического представления. Согласно Пойнтингу, существует поток электромагнитной энергии, где одновременно присутствуют как электрическое, так и магнитное поля. Тем самым сделалось возможным определить путь, которым химическая энергия, превращающаяся в электромагнитную в гальваническом элементе, переходит в провода, образующие цепь, где затем эта энергия превращается в джоулево тепло; аналогично мы можем проследить путь энергии в электрическом моторе, где она преобразуется в механическую работу. Для нас такой подход представляется самым собой разумеющимся; во времена Пойнтинга он служил поводом для значительных концептуальных трудностей и получил свое признание отнюдь не сразу.

Для одного специального случая представление об энергии, распределенной по пространству, и ее потоке через пустое пространство было уже известно, и это обстоятельство в высшей степени облегчило проникновение новых идей Пойнтинга. Тело, испускающее свет или тепло, теряет энергию, эта энергия не проявляется как энергия другого тела, до тех пор, пока излучение не достигнет этого тела. Следовательно, если полная сумма всех энергий системы должна оставаться постоянной, то излученная энергия в промежуточное время должна существовать в виде энергии излу-

ч е н и я. Вместе с тем теория Максвелла, столь блестяще подтвержденная опытами Герца, указала на то, что световое и тепловое излучения представляют собой электромагнитные колебания; формулы этой теории для плотности и потока электромагнитной энергии, как это оказалось, в точности соответствуют привычным идеям, касающимся излучения. Таким образом, физики последнего десятилетия XIX в. постепенно приучались применять новые представления к другим электромагнитным полям.

Вместе с тем представление о линейном импульсе требовало подобного же обобщения. Клерк Максвелл (1837—1879) в своей всеобъемлющей книге, *Treatise of Electricity and Magnetism* (1873 г.) показал, что тело, поглощающее световой луч, испытывает силу, направленную по этому лучу; ее величина, отнесенная к единице площади поперечного сечения луча, оказалась равной энергии потока S , деленной на скорость света c . Экспериментально это утверждение было подтверждено значительно позже: в 1901 г. П. Н. Лебедевым, в 1903 г. Никольсом и Гуллем и, наконец, с точностью до двух процентов Герлахом и Голzenом в 1923 г. Но уже до этого возник вопрос о справедливости закона сохранения импульса.

Теперь мы знаем, что тело, которое испускает луч света, испытывает силу, противоположную той, которую испытывает тело, поглощающее его; а так как излучение и поглощение происходят за одинаковые промежутки времени, то эти два изменения линейного импульса, в конце концов, в точности компенсируют друг друга. Но когда луч идет от одного тела к другому, полный механический импульс определенно отличается от полного импульса, измеренного как перед процессом испускания, так и после поглощения. Если мы хотим сохранить закон сохранения импульса, мы не можем поступить иначе, как приписать лучу э л е к т р о м а г н и т н ы й и м п у л ь с и отнести закон сохранения сумме механического и электромагнитного импульсов. И далее, не остается другой возможности, как распространить это новое представление на все электромагнитные поля, не ограничивая его применение к быстропеременным полям, какими являются тепловое и световое излучения. Выяснилось, что поле обладает импульсом, имеющим величину S/c^2 в единице объема, причем символ S обозначает величину потока электромагнитной энергии; направления обоих векторов совпадают. Величина

$$g = \frac{S}{c^2}$$

представляет собой плотность импульса поля. Наука обязана этим фундаментальным шагом Анри Пуанкарэ (1854—1912); его работа содержится в юбилейном томе, посвященном Лоренцу, в 1900 г.

Согласно этой теории, статические поля также могут создавать поток энергии, если только электрическое и магнитное поля перекрываются. Однако в этом случае путь, по которому движется этот поток, всегда замкнут; поток энергии замыкается на себя без того, чтобы где-либо происходило превращение энергии в какую-либо другую форму. Этот вывод неоднократно использовался в качестве возражения при обсуждении закона Пойнтинга. Фактически при энергетическом рассмотрении абсолютно допустимо полностью пренебречь такими замкнутыми потоками энергии.

Но согласно Пуанкарэ в таких статических полях мы также встречаемся и с линейным импульсом. Для поля в целом полный импульс всегда равен нулю; но локальный импульс в общем случае создает вращательный импульс, полная сумма таких импульсов уже отлична от нуля. Система, состоящая из электрических зарядов и магнитов, находящихся в покое, образует электромагнитный волчок, вращательный импульс которого соответствует вращательному импульсу механического волчка. Постольку,

поскольку состояние системы остается неизменным, вращательный момент того или иного волчка остается ненаблюдаемым. Однако всякое изменение электромагнитного поля, оказывающее влияние либо на величину, либо на направление вращательного момента, должно вызывать закручивающее усилие, действующее на материальные носители зарядов и на магниты, потому что изменения вращательного импульса поля должны быть скомпенсированы соответствующим изменением механического вращательного момента. Такое заключение, которое на первый взгляд представляется удивительным, фактически просто подтверждается хорошо известными силами, испытываемыми движущимися зарядами в магнитном поле и движущимися магнитами в электрическом поле; эти силы могут быть получены в результате соответствующих вычислений. Поэтому становится ясным, что электромагнитный импульс может наблюдаться вовсе не только при тепловом и световом излучениях*).

Важнейшее значение имеет другое заключение, вытекающее из соотношения $g = S/c^2$. Если мы переместим носителя электрических зарядов, то движение соответствующего электрического поля вызовет появление магнитного поля и их совместное существование приведет к возникновению потока энергии и импульса; если система обладает определенными свойствами симметрии, например, тело представляет собой сферу, эти два вектора параллельны скорости тела. Вот здесь впервые мы сталкиваемся с и н е р ц и е й электромагнитной энергии, потому что этот дополнительный импульс олицетворяет собой дополнительную инертную массу. Верно, конечно, что для макроскопического тела эта дополнительная масса пренебрежимо мала для всех экспериментально доступных зарядов. Но если рассматривать электрон как жесткую заряженную сферу радиуса порядка 10^{-13} см, то нетрудно обнаружить, что эта дополнительная инерциальная масса имеет тот же порядок, что и наблюдаемая масса электрона; было время, когда даже подозревали, что вся масса электрона может иметь электромагнитное происхождение. Вскоре после 1900 г. многие физики склонялись к такой точке зрения. Эта гипотеза особенно тщательно была изучена Максом Абрагамом (1875—1922) в знаменитой работе 1903 г.; наиболее удивительным результатом было то, что электромагнитный импульс пропорционален скорости материальной частицы лишь при малых скоростях, но в остальных случаях он растет быстрее и фактически увеличивается неограниченно при приближении скорости электрона к скорости света c . Именно в этом исследовании появилось разделение на две массы, каждая из которых зависит от скорости на п р о д о л ь н у ю м а с с у и п о п е р е ч н у ю м а с с у; однако из этого же исследования явствует, что этот результат весьма незначительно изменяет основную структуру механики. Эти исследования стимулировали осуществление многочисленных экспериментов, в которых со все возрастающей точностью измерялось отклонение быстрых электронов в электрическом и магнитном полях. Результаты этих экспериментов единодушно показывали, что импульс возрастал быстрее возрастания скорости и даже более быстро, чем это следует из механики Абрагама. Эти результаты впоследствии определили выбор между его механикой и релятивистской механикой.

*) Если допустить к рассмотрению (фиктивный) отдельный магнитный полюс величины m и образовать систему, добавив к нему единичный электрический заряд величины e , то вращающий момент поля имел бы направление от e к m , в том случае, если бы e и m имели бы одинаковый знак (в противном случае направление меняется на обратное), а его величина не зависела бы от расстояния между ними и была бы равна em/c . Исходя из этого случая, применяя правила векторного сложения, можно получить выражение для вращательного импульса заряда в поле магнитного диполя, а также и для других более сложных случаев.

Для малых скоростей обе массы, постулированные Абрагамом, переходят в массу покоя m , связанную с электростатической энергией электрона E_0 соотношением

$$m = \frac{4}{3} \frac{E_0}{c^2}.$$

Теоретическое исследование динамики излучения в полости внутри поступательно движущейся оболочки является составной частью того же общего подхода. С момента появления закона излучения Планка в 1900 г. проблема излучения в покоящейся полости была полностью разрешена. В 1904 г. Хазенорль (1874—1915) попытался обобщить теорию на движущуюся полость, а Мозенгейль и Планк завершили это исследование, создав более совершенный теоретический подход к решению вопроса. В случае покоя все лучи вне зависимости от направления распространения обладают одинаковой интенсивностью, тогда как при движении большей интенсивностью обладают те лучи, которые составляют острый угол с направлением движения. Как следствие этого, появляется результирующий импульс в направлении движения. Этот импульс возрастает с ростом скорости быстрее, чем растет скорость, и увеличивается беспредельно, если скорость приближается к скорости света c , причем даже еще быстрее, чем это имело место в случае абрагамовской модели электрона. Общим для обоих случаев является связь между массой покоя m и энергией покоя E_0 . В этом случае мы имеем дело с частным случаем релятивистской механики, который рассматривается без явной ссылки на принцип относительности; но вывод, полученный в согласии с теорией Максвелла, сам по себе обеспечивает соответствие в этом принципом.

В случае сферы, так же как и в случае излучения в полости, полный линейный импульс параллелен скорости. В большинстве же других случаев, однако, полный импульс имеет слагающую, перпендикулярную направлению скорости. Даже тогда, когда движение является чисто поступательным, вращательный импульс будет изменяться, и для компенсации этого изменения материальные носители заряда должны испытывать закручивание, которое вызывает компенсирующее изменение в механическом вращательном импульсе. Таким образом, представляется вполне разумным, что электрически заряженный конденсатор, подвешенный таким образом, что он может свободно вращаться, будет стремиться занять некоторую избранную ориентацию относительно скорости движения Земли, именно ту, в которой вращательный импульс обращается в нуль. Такое заключение совершенно неизбежно в ньютоновской механике. Но Троутон и Нобль в 1903 г. совершенно безуспешно пытались обнаружить этот эффект; даже значительно более точные опыты Томашека (1925—1926) не обнаружили никаких следов такого явления. Их результат является столь же убедительным доказательством справедливости принципа относительности, как и эксперимент Майкельсона с интерферометром. Оба эти эксперимента говорят о необходимости новой механики: эксперимент Майкельсона потому, что он показывает сжатие движущихся тел в направлении движения, а эксперимент Троутона и Нобля потому, что он показывает, что вращательный момент вовсе не всегда приводит к вращению тела, на которое он действует.

Таким образом, новая эпоха в физике создала и новую механику. Эта эпоха также частично перекрывается с предшествующей; она началась, можно сказать, с вопроса о том, какое влияние оказывает движение Земли на физические процессы, происходящие на Земле. Генрих Антон Лоренц (1853—1928) привлек всеобщий интерес к этому вопросу знаменитой статьей 1895 г. Но в этом случае можно приписать черте, разделяющей

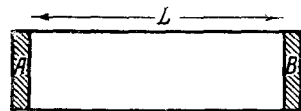
две эпохи, точную дату: эта дата — 26 сентября 1905 г.; в этот день в *Annalen der Physik* появилась статья Альберта Эйнштейна «К электродинамике движущихся тел». Наше рассмотрение не требует изложения теории относительности полностью; мы можем ограничить себя вопросом, каким образом эта теория ведет к признанию того факта, что в с с формы энергии обладают инерцией.

И здесь мы прежде всего должны опровергнуть первый образец национал-социалистского подлога в истории, в данном случае в области физики. В связи с работой Фрица Хазенорля, упомянутой выше, Филипп Ленард и его ближайшие друзья пытались в эпоху «третьей империи» приписывать закон инерции, который приобрел всеобщее внимание в связи с его приложениями к ядерной физике, этому заслуженному, давно умершему физiku. Но изучение литературы совершенно ясно показывает, что Хазенорль в 1904 г. прилагал принятое в то время представление об инерции электромагнитной энергии с некоторым успехом к задаче об излучении в полости. Идея об инерции других форм энергии встречается у него не больше, чем у других физиков, предшествующих Эйнштейну.

В настоящем случае мы должны подчеркнуть, что наше деление на эпохи относится исключительно к макрофизике. Одновременное развитие молекулярной физики происходило по-другому; сначала оно получало от макроскопической физики значительно больше стимулов, чем могло отдать взамен. С момента открытия Планком закона излучения, полученного на основе молекулярно-статистического рассмотрения, это взаимоотношение претерпевало постепенные изменения, так что в последнее время мы уже не можем говорить о двух отдельных подходах в физике; но для наших целей это обстоятельство не является существенным.

V. ИНЕРЦИЯ ЭНЕРГИИ

Утверждение о существовании инерции энергии как таковой было сформулировано Эйнштейном в 1905 г. (*Ann. d. Physik* 18, 639), в том же самом году, когда появилась и его основная статья, посвященная теории относительности. Эйнштейн получил этот закон на основе релятивистских рассуждений. И действительно, строгий вывод должен начинаться именно отсюда. Но год спустя Эйнштейн опубликовал другое рассмотрение, которое является более приближенным, но которое имеет то преимущество, что оно более интуитивно и избегает релятивистских обоснований. Для нас вполне достаточно проследить за его второй аргументацией.



Рассмотрим достаточно большую цилиндрическую полость, свободно парящую в равновесии в пустом пространстве; пусть масса этой полости будет M , а ее длина — L . Поместим на концевых срезах цилиндра два тела, соответственно A и B , массы которых должны быть пренебрежимо малы по сравнению с M , так что в любом выражении, где участвует суммарная масса, они могут быть отброшены (см. рисунок). Пусть A передает B количество энергии ΔE в форме электромагнитных колебаний или света и B полностью поглощает эту энергию. Время, необходимое для излучения, и равное ему время, требуемое для поглощения, должны быть малы по сравнению со временем $T = L/c$, которое равно времени распространения излучения внутри полости. В течение времени испускания тело A получает полный импульс $G = \Delta E/c$, в связи с давлением излучения, а через тело A получает тот же самый импульс цилиндр как целое; центру масс цилиндра можно поэтому приписать скорость $q = \frac{G}{M}$, и так как он будет сохранять

свою скорость в течение времени T , то он сместится на расстояние

$$qT = \frac{L\Delta E}{Mc^2}$$

в направлении от B к A .

После того как тело B примет на себя энергию, полученную в некоторой произвольной форме, мы перемещаем его с помощью некоторой силы, действующей внутри цилиндра до тех пор, пока оно не достигнет тела A . Если мы обозначим массу тела B на этой стадии процесса через m_1 , то центр масс цилиндра переместится на расстояние Lm_1/M в направлении от A к B . Далее, пусть тело B передаст энергию ΔE обратно A , а затем мы снова возвратим тело B в исходное положение, причем снова с помощью внутренних сил. Если масса тела B , после того как оно потеряло энергию ΔE , равна m_2 , тогда смещение центра масс цилиндра в направлении от B к A будет равно Lm_2/M . В конечном состоянии распределение энергии будет в точности соответствовать исходному. Но при этом останется результирующее смещение центра масс на величину

$$\frac{L}{M} \left(\frac{\Delta E}{c^2} + m_2 - m_1 \right)$$

в направлении от B к A .

Можем ли мы поверить в то, что цилиндр может переместить свой центр масс (и вследствие этого, фактически, и самого себя) без всякого действия извне и без всякого изменения в его окружении? Такая возможность не только противоречит механике, но противоречит также и всей нашей физической интуиции, которая, помимо всего прочего, содержит порядочный опытный материал, собранный в течение длительного времени и имеющий немалую ценность, хотя этот опыт зачастую оставался или неосознанным или просто непонятым. Такое смещение может равняться нулю лишь в том случае, когда масса тела, обладающего большей энергией m_1 , превышает массу с меньшей энергией m_2 и именно тогда, когда

$$m_1 - m_2 = \frac{\Delta E}{c^2}.$$

Это и есть та величина, на которую должна увеличиться масса тела, когда оно приобретает энергию ΔE , независимо от того, в каком виде эта энергия приобретается.

Если скорость тела B при движении к телу A равна q_1 , то его импульс равен

$$m_1 q_1 = \left(m_2 + \frac{\Delta E}{c^2} \right) q_1.$$

Разделим это выражение на объем тела B , который мы обозначим через V , чтобы получить плотность импульса (импульс на единицу объема) и плотность энергии ε

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{V}$$

в той степени, в которой эти величины зависят от объема V . Тогда вкладом ΔE в плотность импульса будет

$$g = \frac{\varepsilon}{c^2} q_1.$$

С другой стороны, εq_1 определяет поток энергии S , переносимый конвективным путем. В результате мы приходим к выражению

$$g = \frac{S}{c^2}$$

для плотности импульса, которая связана с переносимой конвективно энергией.

Теперь мы можем несколько изменить наш мысленный эксперимент, который мы теперь рассматриваем так, что энергия ΔE возвращается телу A не конвективным путем, но, например, с помощью вала, соединяющего тела A и B , и который приводится во вращение и, следовательно, закручивается. Мы уже говорили в разделе IV о том, что в таком валу механическая энергия перемещается вдоль его оси. В качестве альтернативы можно указать на возвращение энергии путем теплопроводности. Но с любым потоком энергии указанного вида должен быть связан и импульс в том же самом направлении, если центр масс цилиндра должен вернуться в конце процесса в свое исходное положение. Мы вовсе не нуждаемся в длинных вычислениях, чтобы показать, что плотность импульса и поток энергии должны всегда подчиняться тому соотношению, которое выписано выше*). Следуя Планку, который в 1908 г. первый нашел это соотношение, мы рассматриваем его, как наиболее общее выражение для инерции энергии. Формула

$$m_1 - m_2 = \frac{E}{c^2},$$

использующая представление о массе, немедленно утрачивает свое значение, как только импульс и скорость оказываются не параллельными друг другу. А то, что это зачастую не так, указывалось неоднократно; вращающийся вал является просто одним из ярких примеров.

Если у материального тела есть разница в направлениях между его импульсом и его скоростью, тогда даже чисто поступательное движение будет изменять его вращательный импульс, как это следует из наших предыдущих замечаний. По закону сохранения вращательного импульса потребуются вращательный импульс, чтобы и з б е ж а т ь углового ускорения. Это объясняет эксперимент Троутона и Нобля. Конденсатор находится в упругом напряжении за счет сил его собственного электрического поля. Поэтому механический момент конденсатора составляет некоторый угол с его скоростью. Закручивание, которое согласно

*) Если S есть плотность потока энергии через вал или через проводник тепла, которые возвращают энергию ΔE телу A , и если Q есть площадь поперечного сечения носителя этой энергии, а T' — время, необходимое, чтобы поток энергии вернул энергию ΔE , то мы найдем, что

$$SQT' = \Delta E.$$

С другой стороны, если G — импульс, приобретенный валом или проводником тепла вследствие наличия потока энергии в направлении от B к A , а g — плотность импульса, то

$$G = gQL \text{ и } G/M = gQL/M$$

является скоростью, которую приобретает центр масс цилиндра, поскольку цилиндр должен приобрести компенсирующий импульс — G ; эта скорость направлена от A к B . В течение времени T' центр масс переместится на расстояние

$$GT'/M = gQLT'/M.$$

Это смещение должно быть равно вышеупомянутому смещению в направлении от B к A :

$$L\Delta E/Mc^2 = gQLT'/M,$$

и мы снова приходим к выводу, что

$$g = \frac{S}{c^2}.$$

В этой связи не имеет значения возражение, что в случае передачи тепла или какого-либо другого необратимого процесса будет возрастать энтропия и что, по крайней мере в этом отношении, начальное состояние не может быть восстановлено. Дело в том, что возрастание энтропии само по себе не может вызвать смещения центра масс, если по всем другим причинам, кроме этой, направление смещения остается полностью неопределенным.

разделу IV производит над конденсатором поле, как раз и обеспечивает возможность поступательного движения.

Но если вращательный импульс связан с поступательным движением, то не ликвидируется ли этим первоначальный закон инерции или по крайней мере не ограничивается ли жестким образом его применимость? Этот закон утверждает, что тело, свободное от внешних сил, сохраняет свое состояние движения. Вовсе нет! В случае тела, на которое не действуют силы (изолированная статическая система, выражаясь техническим языком), импульс всегда совпадает по направлению со скоростью. Лишь в отдельных частях системы импульс может отклоняться от направления скорости. Материальные составляющие конденсатора вовсе не свободны от сил, а подвержены действию со стороны поля. Однако физическая система, состоящая из пластинок конденсатора и поля, представляет собой изолированную статическую систему. Таким образом, мы должны принять, что конденсатор не приходит во вращение именно потому, что он участвует в поступательном движении Земли.

Энергия обладает инерциальной массой. Можно ли поэтому с ю н е р ц и а л ь н у ю массу тел приписать их энергетическому содержанию? Должны ли мы принять далеко идущее соотношение

$$m = \frac{E}{c^2}.$$

Теория относительности дает положительный ответ на этот вопрос с самого начала. Именно поэтому можно было соединить плотность энергии, поток энергии и плотность импульса в единую математическую величину, в тензор энергии — импульса. Этим построением мы обязаны Герману Минковскому (1864—1909), который в чрезвычайно изящном математическом оформлении впервые ввел такую величину и переписал оба закона сохранения в виде единой сжатой формулы. Здесь значительно более ясно, чем в механике Ньютона, мы получаем слияние двух законов на основе принципа относительности. Впоследствии опыт подтвердил справедливость этого смелого шага весьма неожиданным способом. Последний раздел нашей статьи как раз посвящен этому вопросу.

Но сначала мы должны объяснить, почему абрагамовская модель электрона, так же как и излучение в полости, приводят к иному соотношению, а именно к соотношению $m = \frac{4}{3} \frac{E_0}{c^2}$. Причина в обоих случаях одна и та же. Электромагнитное поле не может существовать «само по себе», оно требует определенной поддержки совсем иной природы («материальные опоры»). Излучение в полости может существовать только внутри оболочки, а заряженная сфера разлетелась бы на части, если бы не было сдерживающих сил. В обоих случаях движение вызывает поток энергии внутри материальных опор, который направлен в направлении, противоположном движению. Этот поток вносит отрицательный вклад в полный импульс и превращает множитель $\frac{4}{3}$ в единицу. (Мы пренебрегаем здесь, конечно, энергией, присущей самим опорам.) Для сферы мы должны учесть дополнительно еще и то, что — в противоположность предположениям Абрагама — движущаяся сфера, в силу ее сжатия в направлении движения, превращается во вращающийся эллипсоид. Вот почему зависимость импульса от скорости следует релятивистской динамике, а не динамике Абрагама.

Обобщенный закон инерции для энергии утверждает, что каждая инерциальная масса обязана энергии, а всякий импульс обязан потоку энергии. Представление о массе, составлявшее прежде основное представление в физике и меру количества вещества как такового, низвелось до второстепенной роли. Закон сохранения массы оказался излишним,

потому что энергия тела может изменяться при передаче тепла или работы. Все, что осталось от этого закона, включил в себя закон сохранения энергии. С другой стороны, представление об энергии необычайно расширилось. У нас есть причины сомневаться в том, что мы знаем в настоящее время все формы энергии. Но совершенно независимо от этого вопроса мы можем определить полное содержание энергии в теле по его массе. Поэтому мы избавляемся от произвольности в выборе нулевой точки для энергии, которую прежнее определение энергии (см. раздел III) было вынуждено ввести. Существуют не просто *разности* энергии, как это было раньше,—энергия приобрела физически осмысленное абсолютное значение.

Однако один вид энергии современная физика вынуждена исключить из своего списка энергий—речь идет о кинетической энергии,—потому что для энергии E тела, обладающего скоростью q , релятивистская динамика дает выражение

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{q}{c}\right)^2}},$$

где E_0 — энергия тела в состоянии покоя. Согласно этому соотношению, все виды энергии возрастают в результате движения совершенно одинаковым образом. И если мы действительно рассматриваем всю инерцию как принадлежность энергии, тогда мы не можем возлагать на частный вид энергии ответственность за инерцию. Это показывает на то, какое фундаментальное изменение во всей нашей картине физической вселенной произвел закон инерции.

Но как можно согласовать эти выводы с законом сохранения массы, установленным экспериментально, установленным, в частности, точнейшими подтверждениями закона, полученными Ландольтом при его исследованиях химических реакций (ср. раздел II)? Ко всему этому реагенты зачастую в ходе реакции теряют значительные количества тепла.

Рассмотрим в качестве примера соединение одного моля кислорода с двумя молями водорода с образованием двух молей жидкой воды. Если подсчитать по хорошо известной теплоте реакции соответствующую потерю массы, то мы найдем, что на ее долю приходится менее 10^{-10} части от всей входящей в реакцию массы. Предел точности у Ландольта составлял 10^{-6} . Следовательно, он не имел возможности установить релятивистскую потерю массы. Для всех фазовых превращений, таких, например, как конденсация из газообразного состояния в жидкое или твердое, или отверждение жидкости, потеря массы даже еще менее ощутима.

Однако уже в своей первой работе Эйнштейн указал одну возможность для обнаружения потери массы, связанную с передачей энергии: в радиоактивных ядерных превращениях выделяемое количество энергии по отношению к участвующим в превращениях массам значительно больше, чем даже в наиболее энергичных химических реакциях. Это же самое справедливо и для искусственных ядерных превращений, о которых нам стало так много известно после великого открытия Резерфорда в 1919 г. Но этому посвящается уже следующий раздел.

VI. ИНЕРЦИЯ ЭНЕРГИИ В ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ

Химик Жан Шарль Галиссард де Мариньяк из Женевы (1817—1894) писал в 1865 г. в *Liebigs Annalen* по поводу завершенных и намечаемых определений атомных весов следующее:

«Если будущие определения в такой же мере обнаружат элементы, атомные веса которых столь замечательно близки к целым значениям,

то мне представляется неизбежным, что закон Проута придется рассматривать на равных правах с законом Гей-Люссака и Бойля — Мариотта и что мы будем должны признать наличие какой-то важной причины, благодаря которой все атомные веса образуют простые числовые отношения, и некоторой вторичной причины, обуславливающей небольшие отклонения от этого закона».

По всей вероятности Мариньяк просто выражал мнение, широко распространенное в то время. Гипотеза Проута о том, что все атомы образованы из одного или нескольких общих исходных кирпичиков, всегда была очень привлекательной. Конечно, науке пришлось проделать длительный путь, прежде чем эта гипотеза приобрела определенную форму. Одним из необходимых предварительных условий, например, было открытие изотопов Фредериком Содди в 1910 г. Теперь нам известны по нескольку атомов различного атомного веса почти в каждой клетке периодической системы; если определить «единицу массы», приняв атомный вес наиболее распространенного изотопа водорода за 16,000 единиц, то атомный вес всех сортов атомов действительно очень близок к целому числу — «массовому числу». Это утверждение, конечно, не относится к химическим элементам, образованным из нескольких изотопов. Вторым предварительным условием было открытие нейтрона Чадвиком в 1930 г. Вскоре после этого И. Тамм и Д. Иваненко, и несколько позже В. Гейзенберг, выяснили, что причиной целочисленности атомных весов является то, что все атомные ядра состоят из протонов и нейтронов (имеющих почти одинаковый вес) и что потери энергии, сопровождающие соединение этих элементарных частиц, и потери массы, обусловленные инерцией энергии, являются вторичной причиной, вызывающей отклонения от этого закона.

Это можно проиллюстрировать двумя примерами: атомные веса нейтрона и протона равны 1,00895 и 1,00813 соответственно, сумма этих весов равна 2,01708. Однако дейтрон, состоящий из нейтрона и протона, имеет атомный вес, равный всего лишь 2,01472. Разность, составляющая 0,00236 единицы массы, образует дефект масс для дейтрона; возникающая при этом потеря энергии $3,51 \cdot 10^{-6}$ эрг возникает при слиянии протона и нейтрона. Ядро атома лития состоит из трех нейтронов и трех протонов; однако атомный вес этого атома вовсе не равен утроенной величине $2,01708 = 6,05124$, а равен всего лишь 6,01692; дефект масс поэтому равен 0,03432, что соответствует потере энергии $5,11 \cdot 10^{-5}$ эрг при процессе образования атомного ядра из его составляющих. Дефект масс растет с увеличением атомного номера, достигая величины 0,238 для урана. Пример лития показывает, что дефект масс может составлять уже до половины процента от всей массы; это, конечно, совсем другой порядок величины, чем упомянутый выше дефект масс при образовании воды, составляющий 10^{-10} часть.

Точность выполнения закона инерции $E=mc^2$ была проверена Браунбеком (Zs. f. Physic 107, 1 (1937), путем расчета скорости света по этому уравнению для целой серии ядерных реакций, для которых потери энергии и потери массы реагирующих атомов до и после реакции измерялись совершенно независимо друг от друга.*) Например, он использовал дефект масс, равный 0,02462 единицы массы, для превращения вышеупомянутого изотопа лития, имеющего массовое число шесть, при соединении его с дейтроном и образовании двух атомов гелия; такой дефект масс соответствует $4,087 \cdot 10^{-26}$ г; потеря энергии соответственно равна $3,534 \cdot 10^{-5}$ эрг.

*) В настоящее время нет никакой необходимости ссылаться именно на эти работы, так как справедливость этого соотношения подтверждена всем ходом развития ядерной физики. *Прим. пер.*

Из этих данных получается для скорости света значение $2,94 \cdot 10^{10}$ см/сек. Рассчитав среднее значение для многих различных превращений ядер, Браунбек получил значение $2,98 \cdot 10^{10}$ см/сек, что всего лишь на 0,4% ниже значения $2,998 \cdot 10^{10}$ см/сек, полученного на основе электрических или оптических измерений.

Все эти проверки, однако, имели дело только с изменением энергии и массы, а не со всей массой тела. Значительно более важным было совершенно неожиданное наблюдение, сделанное в камере Вильсона в связи с открытием Андерсоном позитрона (электрона с положительным зарядом). В непосредственной близости от атомного ядра, которое служит лишь катализатором, γ -излучение может превратиться в пару электронов, отрицательного и положительного заряда. Вовсе не всякое γ -излучение пригодно для этого; частота γ такого γ -излучения должна быть столь велика, чтобы квант энергии этого излучения $h\nu$ был выше величины $1,64 \cdot 10^{-6}$ эрг. Так как масса покоя электрона — положительного или отрицательного — равна $9,1 \cdot 10^{-28}$ г, то он имеет энергию покоя $8,2 \cdot 10^{-7}$ эрг. Из всего этого следует, что γ -квант должен быть достаточно велик, чтобы обеспечить оба электрона их энергией покоя; остаток энергии передается электронам в виде определенной скорости. Закон сохранения заряда при этом не нарушается: полный заряд электронной пары равен нулю.

Но возможен также и процесс, обратный образованию пары электронов. Верно, конечно, что мы никогда не наблюдали в камере Вильсона, как отрицательный и положительный электрон взаимно поглощают друг друга и при этом испускают γ -излучение. Но такое аннигиляционное излучение хорошо известно экспериментаторам другими способами, например, Джесс Дюмонд с помощью кристаллического спектрометра измерил длину его волны, оказавшуюся равной $2,4 \cdot 10^{-10}$ см. Согласно всем этим наблюдениям, закон инерции может рассматриваться как один из таких результатов в физике, которые надежнейшим образом подтверждены.

Таким образом, мы проследили историю законов сохранения импульса и энергии вплоть до их места в построении современной физики. На любого вдумчивого человека не может не произвести сильного впечатления последний вывод, который хотя и является до известной степени крайностью, но вместе с тем вполне подтверждается экспериментально; этот вывод состоит в том, что по крайней мере для электрона масса представляет собой не что иное, как некоторую форму энергии, которая время от времени может превращаться в другую форму. До последнего времени все наше представление о природе вещей опиралось на понятие о массе. То, что обладает массой, так мы рассуждали, имеет свою индивидуальность; по крайней мере, гипотетически, мы можем проследить за судьбой этого в течение времени. И это оказывается, очевидно, неправильным для электронов. Сохранится ли это положение для других элементарных частиц, например для протонов и нейтронов*)? Если нет, то что же тогда остается от субстанциальной природы этих элементов и всех атомных ядер, другими словами, от всего вещества? Но ответ на этот вопрос составляет уже серьезную проблему для физики будущего.

Но здесь поднимается и большее число проблем. Возможно ли перенести понятие об импульсе и энергии в любую физическую теорию

*) Напомним, что за последние три года были открыты также антипротоны и антинейтроны, основным свойством которых является взаимное поглощение с соответствующей частицей (т. е. с протоном или нейтроном) с последующим испусканием γ -квантов. Во всех этих реакциях соблюдаются законы сохранения энергии, импульса и закон сохранения заряда. Таким образом, ответ на поставленный вопрос уже дан и состоит в том, что электроны в отношении их способности взаимно уничтожаться с позитронами отнюдь не являются исключением. *Прим. перев.*

будущего. Соотношение неопределенностей В. Гейзенберга, согласно которому мы не можем точно определить положение и импульс частицы в один и тот же момент времени (законы природы не позволяют сделать этого), может иметь только тот смысл для любого физика, который верит в наличие связи между причиной и действием, что по крайней мере одно из этих двух понятий — координата или импульс — является недостаточным для описания явлений *). Однако современная физика не в состоянии указать никакой замены для этих понятий. На этом примере мы видим с особенной отчетливостью, что физика никогда не будет полностью завершенной, а что она, непрерывно изменяясь, приближается шаг за шагом к истине.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. М. Планк, Принцип сохранения энергии, ОНТИ, 1938 г.
2. Н. А. У м о в, Диссертация: «Уравнения движения энергии в твердых телах», МГУ, 1874 г.

*) Этим мимолетным замечанием Лауэ, по-видимому, хочет подчеркнуть, что он не считает современную квантовую механику достаточно полной, а думает, что в принципе возможна более совершенная теория. Известно, что такой точки зрения до конца своей жизни придерживался Эйнштейн и что она не разделяется большинством современных физиков. Этому вопросу был посвящен ряд статей в УФН: В. Ф о к, 62, 461 (1957), Н. Б о р, 66, 571 (1958), Н. Бор, 67, 37 (1959). См. М. Лауэ, История, физики, Гостехиздат, 1956 г. *Прим. перев.*
