

Я. М. ГЕЛЬФЕР

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1967

530.1

Г 32

УДК 530.10 (023)

АННОТАЦИЯ

Законы сохранения среди всех законов природы занимают особое место. Общность и универсальность законов сохранения определяют их большое научное, методологическое и философское значение. С законами сохранения связано введение в современную физику идей, имеющих принципиальное значение.

В этой книге популярно рассмотрены развитие и роль законов сохранения как в классической, так и в современной физике; их научное и методологическое значение выявляется на фоне исторического развития, поскольку развитие и обобщение законов сохранения происходило вместе с развитием всей физики, от первых робких догадок античных натурфилософов через классическую механику и электродинамику до теории относительности и физики микромира.

Рассчитана на читателей со средним образованием, интересующихся общими и методологическими вопросами физики. Она может быть также полезной преподавателям физики средних школ и студентам вузов.

Оглавление

Предисловие	5
<i>часть первая</i>	
ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКЕ	
Глава I. Исторические корни законов сохранения . .	7
Идея сохранения движения в античной натурфилософии (7). Идея сохранения движения в механике. Исследования Галилея (9). Исследования Декарта. Закон инерции — исторически первый закон сохранения. Закон сохранения количества движения (13). Развитие идеи сохранения движения в трудах Гюйгенса. Проблема удара упругих тел. Две меры механического движения (16). Отношение Ньютона к идее сохранения движения (21). Понятие силы у Ньютона и Лейбница (25). Спор о мере движения. Развитие теории «живых сил» у И. Бернулли (31). Законы сохранения в механике Галилея—Ньютона и их связь со свойствами пространства и времени (44). Принцип исключенного вечного двигателя (47). Закон сохранения момента количества движения. Общие замечания (51).	
Глава II. Законы сохранения массы и электрического заряда	54
Идея сохранения материи в античной натурфилософии (54). Возникновение теории флогистона (57). Борьба Ломоносова против теории флогистона. Закон сохранения материи и движения. Значение закона Ломоносова в науке (59). Исследования Лавуазье. Крушение метафизической концепции «невесомых флюидов» (64). Закон сохранения электрического заряда. Опыты Кулона и Фарадея (68).	
Глава III. Закон сохранения и превращения энергии	75
Научные и технические предпосылки открытия закона (75). Развитие понятий энергии и работы (84).	

Открытие закона сохранения и превращения энергии. Исследования Майера и Джоуля (90). Количественное выражение закона у Гельмгольца. Первые успехи закона сохранения и превращения энергии (99). Закон сохранения энергии и классическая физика второй половины XIX в. (106). Возникновение «энергетизма» и его критика В. И. Лениным (112).

Глава IV. Дальнейшее развитие понятий энергии и импульса 121

Трудности определения потенциальной энергии (121). Развитие теории электромагнетизма и учение о локализации и потоке энергии (126). Электромагнитная теория света. Импульс и масса электромагнитного поля. Исследования Дж. Томсона (130). Давление света. Опыты Лебедева. Распространение законов сохранения на электромагнитное поле. Инертная масса поля (139). Масса электромагнитного поля и ее экспериментальное подтверждение (146).

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКЕ

Глава I. Законы сохранения в теории относительности 153

Общие замечания (153). Масса, импульс и энергия в теории относительности. Вопрос о двух мерах движения (157). Законы сохранения в теории относительности. Закон взаимосвязи массы и энергии (164). Инвариантность и ковариантность физических законов — обобщение идеи сохранения (174).

Глава II. Симметрия, принципы инвариантности и законы сохранения 177

Учение о симметрии и ее связь с законами природы (177). Некоторые физико-математические вопросы (182). Теорема Нётер. Пространство, время и законы сохранения (189).

Глава III. Законы сохранения в микромире 196

Квантовая теория — фундамент физики микромира (196). Специфические закономерности микропроцессов (202). Понятия энергии и импульса в микромире (207). Классические законы сохранения в микромире (210). Специфические законы сохранения и симметрия в микромире (227). Специфические законы сохранения в теории элементарных частиц (233). Нарушение закона сохранения четности в слабых взаимодействиях и связанные с этим проблемы (246). Некоторые методологические и философские вопросы (259).

Среди физиков вера в законы сохранения была так сильна, как если бы они представлялись очевидными.

Е. Вигнер

Предисловие

Среди всех законов природы законы сохранения занимают особое место. Исключительная общность и универсальность законов сохранения определяют их научное, методологическое и философское значение. Они являются основой важнейших расчетов в физике и ее технических приложениях, позволяют в ряде случаев предсказывать различные эффекты и явления при исследовании разнообразных физико-химических систем и процессов. С законами сохранения связано введение в современную физику фундаментальных идей, имеющих принципиальное значение.

Законы сохранения служат пробным камнем любой общей физической теории. Непротиворечивость теории этим законам служит убедительным аргументом в ее пользу и является важнейшим критерием ее истинности. Поэтому в современных физических теориях далеко не последнюю роль играет идея сохранения специфических для данной теории величин, причем зачастую поиски таких величин являются важнейшей целью теории.

В законах сохранения находят свое отображение важнейший диалектико-материалистический принцип неуничтожимости материи и движения, взаимосвязь между различными формами движущейся материи и специфика превращения одной формы движения в другую.

Научное и методологическое значение законов сохранения в достаточно полной мере выявляется только на фоне исторического развития общей идеи сохранения. Открытие и обобщение этих важнейших законов природы происходило вместе с развитием всей физической науки, от первых робких догадок античных натурфилософов через классическую механику и

электродинамику до теории относительности, квантовой механики и физики элементарных частиц. Именно поэтому в данной книге законы сохранения рассмотрены в историческом плане. В ней также показано, как развитие идеи сохранения влияло на формирование фундаментальных представлений классической и современной физики и как возникавшие подчас драматические ситуации в процессе ее развития удавалось разрешать с помощью идей, основанных на законах сохранения.

Книга рассчитана на читателей, интересующихся общими и методологическими вопросами физики, а также историей развития важнейших принципов современной науки. Автор также надеется, что его труд может оказаться полезным студентам и преподавателям физических факультетов и институтов.

Рукопись книги была прочитана профессорами И. В. Кузнецовым и А. С. Компанейцем, которых автор благодарит за полезные критические замечания и советы, учтенные при подготовке рукописи к печати.

Законы сохранения в классической физике

ГЛАВА I

Исторические корни законов сохранения

Идея сохранения движения в античной натурфилософии

Открытие законов сохранения тесно связано с историей всего естествознания и в первую очередь с формированием и развитием основных понятий классической механики. Однако первые робкие идеи о сохранении материи и движения встречаются еще в трудах натурфилософов античного периода.

На заре развития древнегреческой философии, в IV в. до н. э., представители материалистической ионийской школы объясняли все многообразие явлений природы движением некоторого единого материального первоначала. Яркое выражение эта идея находит у Гераклита Эфесского и особенно у атомистов — Демокрита, Левкиппа и Эпикура. Как известно, атомисты объясняли все многообразие мира сочетанием атомов, движущихся в пустом безграничном пространстве. Это движение вечно, оно никогда не исчезает, так как нет никаких причин, в силу которых атомы могли бы остановиться. Исходя из идеи вечности движения, Демокрит пришел к заключению, что в пустоте тело должно оставаться либо в покое, либо двигаться бесконечно. Тем самым Демокрит предвосхитил один из важнейших законов природы — закон инерции, являющийся прямым следствием закона сохранения количества движения.

Атомисты высказывали идею сохранения в различной форме. Так, Демокриту принадлежит изречение: «Ничто из того, что есть, не может быть уничтожено. Всякое изменение есть только соединение и разделение частей»¹⁾. Аналогичную мысль высказывал и Эпикур: «Ничто новое во вселенной не возникает вне уже происшедшего безграничного времени»²⁾.

Большое значение в развитии учения о движении имели идеи Аристотеля. Великий философ древности соглашался с атомистами, что в пустоте тело, раз приведенное в движение, не остановится: «Ибо почему оно скорее остановится здесь, а не там?» — спрашивал он³⁾. Однако, говорил он далее, наличие среды будет изменять характер движения таким образом, что оно будет отлично от движения в пустоте. Именно по этой причине в обычных условиях тело не может двигаться бесконечно.

В последующие века учение Аристотеля о движении было искажено и приспособлено к нуждам схоластики.

В философской поэме древнеримского ученого и поэта Лукреция Кара «О природе вещей», которую можно рассматривать как своеобразную поэтическую энциклопедию античной науки⁴⁾, идея сохранения движения получает более конкретное выражение. Так, в одной из частей поэмы мы читаем:

Думая, что прекратить все движения могут начала
И возбудить вслед затем меж вещами ряд новых
движений,
Ты уклоняешься очень далеко от верного взгляда.
Вечно в пространстве блуждают они и должны
непрерывно
Или от действия собственной тяжести прочь
относиться,
Или же силой толчка, когда встретившись в
быстром движении,
Вдруг они в разные стороны вновь оттолкнутся
взаимно⁵⁾.

¹⁾ Сб. «Материалисты древней Греции», Госполитиздат, М., 1955, стр. 62.

²⁾ Там же, стр. 232.

³⁾ Аристотель, Физика, М.—Л., 1936, стр. 215а.

⁴⁾ Подробно см. в кн.: С. И. Вавилов, Физика Лукреция, Собр. соч., т. III, Изд-во АН СССР, М., 1956, стр. 646.

⁵⁾ Лукреций, О природе вещей, М., 1933, стр. 33.

Догадки, сколь гениальными они ни были бы, естественно, остаются догадками. Дальше этих догадок античные натурфилософы пойти не смогли.

Из конкретных достижений античной механики, имеющих отношение к нашей теме, следует отметить результаты Архимеда, установившего, по сути дела, первый энергетический принцип — так называемое «золотое правило механики» для случая рычага.

В своем трактате «О равновесии плоских фигур» Архимед следующим образом формулирует этот принцип: «Равные тяжести на равных длинах уравниваются, на неравных же длинах не уравниваются, но перевешивают тяжести на большей длине»¹⁾.

Дальнейшее развитие идея сохранения движения получила только в XVII в. в период становления и развития классической механики.

Идея сохранения движения в механике. Исследования Галилея

К концу XVII в. ученые на основании наблюдений над движением тел уже достаточно ясно представляли себе содержание простейших кинематических понятий — пути, скорости и ускорения. Эти понятия носили еще в значительной степени антропоморфный характер, и какие-либо четко определенные соотношения между ними не были установлены. Первым важным шагом на пути создания науки о движении — механики — было абстрагирование от антропоморфных представлений. Следующим шагом явилась идеализация движения — отвлечение от роли конкретной среды. Гениальный ум Галилея сумел подняться до таких высот абстракции и тем самым заложить основы механики как науки. От работ Галилея ведет свое начало и идея сохранения некоторой меры механического движения.

После умозрительных рассуждений античных натурфилософов Галилей, обратившись к опыту, четко сформулировал закон инерции, в котором увидел проявление основного свойства механического

¹⁾ Архимед, Сочинения, Физматгиз, М., 1962, стр. 272.

движения — его неуничтожимость. В «Беседах и математических доказательствах, касающихся двух новых наук» (1638 г.), Галилей следующим образом формулирует этот закон: «Когда тело движется по горизонтальной плоскости, не встречая никакого сопротивления движению, то... движение его является равномерным и продолжалось бы бесконечно, если бы плоскость простиралась в пространстве без конца» ¹⁾).

Свой вывод Галилей подтверждает несколькими экспериментами. В одном из них он изучает движение тел по наклонной плоскости и приходит к выводу, что чем меньше наклон плоскости к горизонту, тем больший путь должно пройти тело, чтобы достичь прежнего положения. В конце концов, когда наклон будет равен нулю и плоскость станет горизонтальной, тело будет продолжать движение бесконечно с постоянной скоростью.

В опытах с наклонной плоскостью Галилей доказывает также важное положение о том, что скорость свободно падающего тела зависит только от расстояния по вертикали между начальным и конечным положением этого тела. Значительно позже было показано, что эта теорема Галилея является энергетическим принципом.

В истории законов сохранения исследования Галилея занимают видное место не только потому, что он впервые открыл некоторые механические принципы, оказавшиеся следствиями закона сохранения энергии, а также и потому, что великий ученый сделал первую попытку установить меру механического движения, его количественное выражение. Этой мерой является некая величина, которую Галилей называл «моментом».

Впервые с этим понятием мы встречаемся в «Механике» (1600 г.) — книге, в которой Галилей развивает общую теорию простых машин, основанную на представлениях кинематической и геометрической статики. «Момент — это стремление двигаться вниз, вызванное не столько тяжестью движущегося тела, сколько тем, как различные тяжелые тела разме-

¹⁾ Галилео Галилей, Беседы, М.—Л., 1934, стр. 417—418.

щаются относительно друг друга; при этом часто наблюдается, что благодаря моменту более тяжелые тела перевешиваются более легкими; например, в безмене, где крошечный противовес поднимает огромный груз не из-за избытка тяжести, а из-за удаленности от точки, где безмен поддерживается, из-за удаленности, которая в сочетании с тяжестью меньшего груза увеличивает ему момент — импето опускаться вниз, которым он может превысить момент другого, более тяжелого тела. Итак, момент — это импето опускаться вниз, состоящее из тяжести, положения и всего остального, что может вызвать такое стремление»¹⁾. (Словом «импето» Галилей обозначает стремление к движению, действию. В некоторых случаях Галилей отождествляет его с понятием импульса.)

Здесь определение момента еще несовершенно и его механический смысл недостаточно ясен. Галилей широко пользуется этим понятием. В своих более поздних трудах по механике и гидростатике он постоянно возвращается к понятию момента, стремясь его уточнить и расширить. Так, в работе «Рассуждение о телах, пребывающих в воде», дается следующее определение момента: «Под именем момента в механике разумеется та сила, то усилие, то действие, с которым двигатель двигает, а движимое сопротивляется; эта сила зависит не только от простой тяжести, но и от скорости движения и от различного наклонения путей, по которым совершается движение, потому что тяжесть производит большее действие при опускании по более наклонному пути, чем по менее наклонному... Два абсолютно равных груза, движущихся с равными скоростями, обладают одинаковой силой или одинаковым моментом при всех своих действиях»²⁾.

Понятием момента Галилей широко пользуется и в своем важнейшем сочинении «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых наук».

Великим научным достижением Галилея явилось открытие принципа относительности движения,

¹⁾ Галилео Галилей, Избранные труды, Изд-во «Наука», т. II, М., 1964, стр. 10—11.

²⁾ Там же, стр. 46.

Который с полным основанием можно рассматривать как исходный принцип развития механики вообще. Обобщая свои наблюдения над механическими явлениями, Галилей пришел к выводу, что в равномерно и прямолинейно движущихся системах отсчета все механические явления будут протекать одинаково. Таким образом, впервые было возведено в научный принцип положение о равноправности инерциальных систем отсчета. По сравнению с мировоззрением античности и средневековья это явилось огромным качественным скачком вперед. Хотя все значение принципа относительности в физике стало ясно значительно позднее, сам Галилей на его основе получил важные научные результаты.

Одним из методологических следствий принципа относительности Галилея является вывод об однородности и изотропности пространства. Действительно, если во вселенной все системы отсчета равноправны и Земля, следовательно, не является привилегированной системой отсчета (с этих позиций Галилей вел борьбу за утверждение коперниканского учения против геоцентризма Птолемея), то в пространстве должны быть равноправными все точки и все направления. А это и означает однородность и изотропность пространства.

Следует упомянуть еще об одном достижении Галилея, имеющем отношение к истории принципов сохранения. Анализируя закон равновесия рычага, он высказал в элементарной форме принцип виртуальных перемещений и принцип виртуальных скоростей: «Из этого рассуждения (закона равновесия рычага. — Я. Г.) узнаем, что скорость движения оказывается в состоянии увеличить момент в движущемся теле в том же отношении, в котором возрастает сама скорость движения»¹⁾. В дальнейшем Галилей распространил этот принцип на все простые машины, связанные с рычагом и наклонной плоскостью.

Мы видим, таким образом, что уже на ранней ступени развития механики при изучении простейших механических явлений Галилеем были получены важ-

¹⁾ Галилео Галилей, Избранные труды, т. II, стр. 15.

ные научные результаты, имеющие прямое отношение к принципу сохранения движения. Следует отметить, однако, что сам Галилей еще не видел связи между открытыми фактами и идеей сохранения движения. Эта связь была обнаружена позже.

Галилей, конечно, был далек и от признания связи между свойствами пространства и идеей сохранения. Установление этой связи явилось достоянием науки XX в. Тем не менее эта связь по существу уже заключалась в скрытой форме в замечательных открытиях великого итальянского физика.

Исследования Декарта. Закон инерции — исторически первый закон сохранения. Закон сохранения количества движения

Впервые связь инерции с идеей сохранения движения была выявлена в трудах французского ученого Рене Декарта, у которого физико-механические проблемы тесно переплетаются с проблемами философскими. Декарт считал законы механики универсальными, которые должны оправдываться как при движении макротел, так и при движении атомов. Отсюда он пришел к выводу, что все явления природы, начиная от космических и кончая биологическими, могут быть объяснены на основе простых механических принципов. Это мировоззрение, поддержанное и развитое в последующее время другими учеными, получило название механицизма. Механицизм сыграл особенно заметную роль в период становления и развития классической физики в XVIII—XIX вв. и поэтому не мог не сказаться также на развитии идеи сохранения движения.

Придавая первостепенное значение механике как основе познания мира и его закономерностей, Декарт большое внимание уделял обоснованию и развитию основных механических принципов. В одном из своих важнейших сочинений «Начала философии» (1644 г.), анализируя известные свойства движения, он высказывает положение, которое по существу является первоначальной формулировкой закона сохранения количества движения, хотя и теологической по форме. Отвечая на поставленный им же вопрос о первопричине

движения во вселенной, Декарт пишет: «Что касается первопричины, то мне кажется очевидным, что она может быть только богом, чье всемогущество сотворило материю вместе с движением и покоем и своим обычным содействием сохраняет во вселенной столько же покоя и движения, сколько оно вложило в нее при творении»¹⁾.

Далее, согласно Декарту, создав во вселенной постоянное количество движения, бог предоставил природе действовать самостоятельно, согласно ее собственным законам. Этими законами являются следствия «божественного творения» — постоянство движения и покоя. Первое из них гласит, что «каждая часть материи по отдельности всегда продолжает оставаться в одном и том же состоянии до тех пор, пока встреча с другими частями не вызовет изменения этого состояния»²⁾. Второе следствие заключается в том, что «когда одно тело сталкивается с другим, оно может сообщить ему лишь столько движения, сколько одновременно потеряет, и отнять у него столько лишь, насколько оно увеличит свое собственное движение»³⁾. Ясно, что первое следствие Декарта — это закон инерции Галилея, а второе — примитивная формулировка закона сохранения количества движения.

Для того чтобы положение о сохранении движения превратилось в физический закон, необходимо было сделать следующий шаг и установить меру количества движения. В качестве таковой Декарт, исходя из галилеевского понятия о «моменте», предложил произведение «величины тела на скорость его движения». У Декарта и его современников понятие массы тела как величины, характеризующей количество вещества в теле, еще отсутствует. Поэтому вместо массы он говорит о «величине тела». Предложенная мера выступает у Декарта как важнейшая характеристика движения, хотя смысл ее он, по-видимому, себе еще не представляет.

Таким образом, если у Галилея фигурируют лишь простейшие кинематические понятия и введенное им

¹⁾ Р. Декарт, Избранные произведения, Госполитиздат, М., 1950, стр. 485.

²⁾ Там же, стр. 486.

³⁾ Там же, стр. 489.

понятие «импето» еще расплывчато и неопределенно, то в механике Декарта появляется четко определенная динамическая величина — количество движения как мера механического движения. Введением этой меры французский философ сделал шаг вперед на пути развития механики.

Возникает вопрос: почему Декарт выбрал в качестве меры движения именно произведение mv ? Помимо ссылок на некоторые идеи Галилея, о которых упоминалось выше, Декарт основывался и на своих собственных наблюдениях, которые привели его к заключению, что при ударе тел эта величина должна оставаться постоянной. Так, в одном из писем, датированном 1639 г., Декарт писал: «Я принимаю, что во вселенной, во всей созданной материи есть известное количество движения, которое никогда не увеличивается, не уменьшается, и, таким образом, если одно тело приводит в движение другое, то теряет столько своего движения, сколько его сообщает. Так, если камень падает с высокого места на землю, то в случае, когда он не отскакивает, а останавливается, я допускаю, что он колеблет землю и передает ей свое движение. Но так как часть земли, приведенная в движение, содержит в себе в тысячу, например, раз более материи, чем сколько заключается в камне, то, передав свое движение, он может сообщить только в тысячу раз меньшую скорость»¹⁾).

Таким образом, мы видим, что Декарт провозгласил закон сохранения количества движения универсальным законом природы. Эта универсализация закона явилась прямым следствием декартовского механицизма, отрицавшего существование иных форм движения, кроме механической. «Я знаю только одно движение, — писал он, — это движение заключается в том, что тела переходят из одного места в другое, последовательно занимая все пространства, которые находятся между этими местами»²⁾).

Дальнейшее развитие идея сохранения в механике получает в связи с разработкой теории удара упругих тел.

¹⁾ Цит. по кн.: Н. А. Любимов, История физики, СПб., ч. III, 1896, стр. 465.

²⁾ Р. Декарт, Избранные произведения, стр. 492.

**Развитие идеи сохранения движения
в трудах Гюйгенса.
Проблема удара упругих тел.
Две меры механического движения**

Среди механических проблем, привлекавших внимание ученых XVII в., одно из центральных мест занимала проблема удара. Представляя один из простейших случаев взаимодействия тел, проблема удара имела и практическое значение. Неудивительно поэтому, что многие выдающиеся математики и механики того времени посвящали этой проблеме большое число исследований.

Первым ученым, занявшимся проблемой удара, был Галилей, который изложил свои результаты в «Беседах»¹⁾. Галилей не решил проблемы, хотя и пытался рассмотреть вопрос о мере силы удара и опытных способах определения этой силы.

В 1668 г. проблема удара была выдвинута в качестве научной темы на конкурс Лондонским Королевским обществом. В конкурсе приняли участие такие известные ученые, как Врен, Валлис, Гюйгенс и другие.

Профессор математики Врен установил в своих исследованиях некоторые закономерности при ударе упругих тел и демонстрировал их на опытах с маятниками перед членами Королевского общества.

Валлис, также профессор математики, исследовал другой крайний случай удара — неупругий удар.

Следует отметить, что и Декарт, который все взаимодействия тел сводил к давлению и удару, также занимался проблемой удара, применяя к нему свой закон сохранения количества движения.

Теория удара — это механическая задача о кратковременном взаимодействии двух или нескольких тел. Ее решение должно было дать ответ относительно величин сил, действующих при ударе, и скоростей тел после удара. Легко понять те трудности, которые стояли на пути первых исследователей проблемы удара, если вспомнить, что в XVII в. еще не было

¹⁾ Галилео Галилей, Избранные труды, т. II, стр. 381.

четких представлений о таких важнейших механических величинах, как сила, масса, не говоря уже о более сложных понятиях (импульс силы, абсолютно упругое тело и др.).

Из других, кроме упомянутых выше, следует отметить исследования замечательного итальянского ученого Торричелли. Ученик и последователь Галилея Торричелли рассматривает вопросы удара в своем основном механическом сочинении «О движении тяжелых тел, опускающихся естественным образом, и снарядов» (1644 г.), а также в специальной работе «Об ударе» (1644 г.). В этих исследованиях итальянский ученый развивает поставленный еще его учителем вопрос о различии давления тяжелого покоящегося груза и давления, возникающего при ударе падающего тела. Полной ясности у Галилея в этом вопросе еще не было. Торричелли пишет по этому поводу: «Когда тяжелые тела покоятся, то все импульсы уничтожаются подпирающим телом, которое, не скрывая своего противодействия, непрерывно гасит все эти возникшие моменты. Однако, когда те же тяжелые тела падают в воздухе, то все эти импульсы не гасятся, но сохраняются в нем и множатся»¹⁾. Мы видим, что он довольно близко подошел к правильному пониманию импульса силы. Торричелли еще долго до появления классического сочинения Ньютона составил себе ясное представление о массе как мере инертности тела. Уточняя галилеевское понятие «момента», которым он также пользовался, Торричелли заменяет вес тела «количеством материи». Эта «величина» определяет противодействие, которое тело оказывает толчку, поскольку «сама по себе материя мертва, она служит лишь для того, чтобы препятствовать, противиться действующей силе. Материя служит лишь вместилищем силы, моментов и импульса»²⁾.

В рассматриваемый период наиболее важные исследования проблемы удара были выполнены голландским ученым Христианом Гюйгенсом. Эти исследо-

¹⁾ Я. Г. Дорфман, Эванджелиста Торричелли, УФН, т. 66, в. 4, 1958, стр. 661.

²⁾ Там же.

вания были начаты в 1652 г., а в 1656 г. им был написан труд «О движении тел под влиянием удара» (опубликован посмертно в 1703 г.), в котором Гюйгенс изложил в систематической форме все полученные им результаты. В истории развития законов сохранения работа голландского физика занимает видное место как по полученным результатам, так и по применяемым в ней методам. Прежде всего отметим, что здесь широкое применение впервые получает галилеевский принцип относительности движения и закон инерции. Эти фундаментальные механические принципы вместе с открытым Гюйгенсом частным случаем «теоремы живых сил» позволили ему рассмотреть достаточно большое число задач об ударе упругих тел.

В начале своего трактата Гюйгенс формулирует несколько основных принципов («гипотез»), один из которых гласит: «Движение тел, а также их одинаковые или разные скорости надо рассматривать как относительные по отношению к другим телам, которые мы считаем покоящимися, не учитывая того, что как те, так и другие тела могут участвовать в другом, общем движении. Поэтому два тела, соударяясь, даже в случае, если оба вместе участвуют еще в другом равномерном движении, для лица, также участвующего в общем движении, действуют друг на друга так, как будто бы этого общего движения не существовало»¹⁾.

Применительно к закону сохранения количества движения, которым пользуется Гюйгенс, эта его «гипотеза» означает, что если справедливо равенство $m_1 u_1 + m_2 u_2 = m_1 u'_1 + m_2 u'_2$, то справедливо также и $m_1 (u_1 + v) + m_2 (u_2 + v) = m_1 (u'_1 + v) + m_2 (u'_2 + v)$, где v — общая скорость соударяющихся тел.

Гюйгенсова формулировка закона сохранения количества движения противоречит декартовой. Если последний утверждал, что «количество движения всегда сохраняет свою величину», то согласно Гюйгенсу «не всегда сохраняется количество движения, бывшее в обоих телах до удара, но оно может уменьшиться

¹⁾ Х. Гюйгенс, Три мемуара по механике, Изд-во АН СССР, М., 1951, стр. 213—214.

или увеличиться»¹⁾. В 1669 г. он опубликовал работу, в которой был отмечен векторный характер количества движения и дана формулировка закона, учитывающая эту особенность величины *ти*: «Количество движения, которое имеют два тела, может увеличиваться или уменьшаться при столкновении; но его величина остается постоянной в ту же сторону, (в том же направлении), если мы вычтем количество движения обратного направления»²⁾.

Одной из самых замечательных и плодотворных идей Гюйгенса является его принцип движения центра тяжести системы тел, сформулированный и рассмотренный подробно в важнейшей работе «Маятниковые часы» (1673 г.). Принцип этот гласит: «Если любое число весомых тел приходит в движение благодаря их тяжести, то общий центр тяжести этих тел не может подняться выше, чем он был в начале движения...»³⁾.

Гюйгенс не ограничился лишь одним указанием на универсальность своей «гипотезы». С ее помощью он действительно решил ряд важных задач, связанных с движением маятника и ударом упругих тел. Но для многих его современников действительное содержание этой «гипотезы» не было достаточно ясным. Поэтому они сомневались в ее универсальности, а некоторые — даже в ее истинности. В возникшей по этому поводу полемике Гюйгенс убедительно опроверг все возражения своих оппонентов. Если подойти к «гипотезе» Гюйгенса с точки зрения современных энергетических представлений, то по существу она явилась первым достаточно общим выражением закона сохранения механической энергии. Действительно, нетрудно показать, что эта «гипотеза» эквивалентна «теореме живых сил». Пусть имеются два тела, массы которых m_1 и m_2 . Пусть оба тела, падая соответственно с высот h_1 и h_2 , приобретают скорости u_1 и u_2 ; тогда

$$h_1 = \frac{u_1^2}{2g} \text{ и } h_2 = \frac{u_2^2}{2g}.$$

1) Х. Гюйгенс, Три мемуара по механике, стр. 223.

2) Там же, стр. 336.

3) Там же, стр. 122—124.

Общий центр тяжести тел находился на высоте

$$H = \frac{m_1 h_1 + m_2 h_2}{m_1 + m_2} = \frac{m_1 u_1^2 + m_2 u_2^2}{2g(m_1 + m_2)}.$$

После удара оба тела получают соответственно скорости u'_1 и u'_2 , за счет которых они могут подняться на высоты h'_1 и h'_2 . Следовательно, их общий центр тяжести поднимется на высоту

$$H' = \frac{m_1 h'_1 + m_2 h'_2}{m_1 + m_2} = \frac{m_1 u'^2_1 + m_2 u'^2_2}{2g(m_1 + m_2)}.$$

Так как рассматривается только упругий удар, то, согласно «гипотезе», должно быть $H = H'$. Отсюда следует, что

$$\frac{m_1 u_1^2 + m_2 u_2^2}{2g(m_1 + m_2)} = \frac{m_1 u'^2_1 + m_2 u'^2_2}{2g(m_1 + m_2)},$$

или

$$m_1 u_1^2 + m_2 u_2^2 = m_1 u'^2_1 + m_2 u'^2_2,$$

т. е. «теорема живых сил». Хотя Гюйгенс сам еще не пользуется этой теоремой в явном виде, он безусловно имеет ее в виду, когда формулирует и доказывает положение о том, что «при соударении двух тел сумма произведений из их величин на квадраты их скоростей остается неизменной до и после удара»¹⁾. Это — важнейший результат, полученный Гюйгенсом. Следует отметить, что аналогичный результат был получен примерно в то же время Вреном. Несколько позже Валлис показал, что при неупругом ударе произведение mu^2 не остается постоянным. По-видимому, последнее обстоятельство является причиной того, что Гюйгенс не обратил особого внимания на величину произведения массы на квадрат скорости и не счел возможным рассматривать ее в качестве меры механического движения.

Весьма интересным является тот факт, что гюйгеново рассмотрение упругого удара с точки зрения наблюдателя, связанного с движущейся системой отсчета (таковой у Гюйгенса является движущаяся лодка), приводит к взаимосвязи между законами сохра-

¹⁾ Х. Гюйгенс, Три мемуара по механике, стр. 235.

нения «живой силы» и количества движения. Согласно теореме «живых сил» скорости двух упругих тел с массами m_1 и m_2 до и после удара связаны соотношением $m_1 u_1^2 + m_2 u_2^2 = m_1 u_1'^2 + m_2 u_2'^2$. Пусть теперь система, в которой происходит удар, получает некоторую скорость v . Тогда скорости тел до и после удара соответственно будут равны $u_1 + v$, $u_2 + v$, $u_1' + v$ и $u_2' + v$. Подставляя в предыдущее выражение эти скорости, получаем $(m_1 u_1 + m_2 u_2) 2v = (m_1 u_1' + m_2 u_2') 2v$. Но так как скорость v произвольна, то отсюда заключаем, что $m_1 u_1 + m_2 u_2 = m_1 u_1' + m_2 u_2'$, т. е. получаем закон сохранения количества движения.

Таким образом, уже в работах Гюйгенса выявляется существование двух мер механического движения — количества движения mu и произведения массы (у Гюйгенса «величины тела») на квадрат скорости mu^2 — величины, позже получившей название «живой силы». Указанная выше связь между соответствующими законами сохранения этих величин, вытекающая из общей механической концепции голландского ученого, представляется интересной и важной, особенно с точки зрения дальнейшего развития идеи сохранения. Эта связь означает, что требование выполнения закона сохранения механической энергии в любой равномерно движущейся системе влечет за собой и сохранение количества движения.

Отметим также, что Гюйгенс доказывает, а затем использует в своих механических исследованиях важное следствие из закона сохранения количества движения — закон о движении центра тяжести системы. «Общий центр тяжести двух или трех или скольких угодно тел продолжает двигаться равномерно в ту же сторону по прямой линии как до, так и после удара»¹⁾.

Отношение Ньютона к идее сохранения движения

Таким образом, к концу XVII в., точнее к 1686 г., когда вышло в свет классическое произведение Ньютона «Математические начала натуральной филосо-

¹⁾ Х. Гюйгенс, Три мемуара по механике, стр. 366.

фии», механикой уже были достигнуты определенные результаты как в накоплении опытных фактов, так и в их теоретическом осмыслении. Это были еще разрозненные факты, нуждающиеся в систематизации и обобщении. Но несомненно одно: именно они подготовили почву для создания механики как науки.

На долю великого английского ученого выпал этот огромный труд. Он создал настолько стройную и законченную систему механики, что ею не могли не восхищаться как современники, так и ученые последующих поколений. Недаром механика Ньютона позже получила название классической. Почти три века ученые видели в ней и видят теперь образец красоты и законченности физической теории. Анализ ньютоновых «Начал» посвящена огромная литература на многих языках мира. Не ставя перед собой цель изложить хоть в какой-то степени содержание этого великого труда, мы остановимся только на тех моментах, которые имеют отношение к истории законов сохранения.

Многие результаты, полученные как предшественниками, так и современниками, Ньютон получает как следствия из сформулированных им законов движения. В качестве первого закона движения Ньютон формулирует принцип инерции Галилея. Обобщая многочисленные опытные факты, он высказывает важнейшее положение о том, что изменение количества движения тела в единицу времени равно действующей силе. Это положение теперь известно как второй закон движения Ньютона. Из этого закона, а также из положения о равенстве действия и противодействия (третий закон движения Ньютона) сразу же следует постоянство векторной суммы количества движения тел, образующих замкнутую систему: «Количество движения, получаемое, беря сумму количеств движения, когда они совершаются в одну сторону, и разность, когда они совершаются в стороны противоположные, не изменяется от взаимодействия тел между собой»¹⁾. Таким образом, Ньютон идет дальше Декарта, принимая вместе с Гюйгенсом векторный ха-

¹⁾ И. Ньютон, Математические начала натуральной философии. В кн.: А. Н. Крылов, Собр. соч., т. VII, Изд-во АН СССР, 1936, стр. 45.

рактик количества движения. При этом Ньютон дает следующее определение количества движения: «Количество движения есть мера такового, устанавливаемая пропорционально скорости и массе... Количество движения целого есть сумма количества движения отдельных частей его».

Несмотря на то, что Ньютон широко пользовался законом сохранения количества движения в своих механических исследованиях, он не считал его каким-либо особым законом, претендующим на универсальное значение. Этот закон для автора «Начал» был лишь обычным следствием из общих законов движения. Такое отношение, по-видимому, было результатом его общих взглядов на идею сохранения движения вообще. А эти взгляды не отличались достаточной последовательностью. Прежде всего следует отметить, что в ряде мест «Начал» фигурируют величины, имеющие энергетический характер (такowymi, например, являются «*actio agentis*» — произведение силы на скорость), предложения, по существу эквивалентные «теореме живых сил», и др. Однако эти величины вводились лишь в качестве расчетных приемов и никак не связывались с вопросом о мере движения. Ньютонской механике еще чуждо понятие работы и энергии, хотя некоторые ее комментаторы были склонны в отдельных ее положениях видеть чуть ли не начало учения о сохранении энергии. Это, в частности, относится к английской группе физиков прошлого века (В. Томсон, Тэт и Максвелл), которые в «поучении» Ньютона к третьему закону движения увидели «в скрытом виде почти все учение об энергии»¹⁾. В этом «поучении» говорится: «Если действие движущей силы оценивать пропорционально произведению этой силы и скорости и, подобно этому, противодействие сопротивлений оценивать для каждой части в отдельности пропорционально произведению ее скорости и встречаемого ею сопротивления, происходящего от трения, сцепления, веса и ускорения, то во всякой машине действия и противодействия будут постоянно равны»²⁾.

¹⁾ Дж. Максвелл, Материя и движение, Госиздат, 1928, стр. 66.

²⁾ А. Н. Крылов, Собр. соч., т. VII, стр. 56.

Максвелл в своем трактате «Теория теплоты» говорит по поводу этого «поучения», что оно есть «изложение связи между работой и кинетической энергией столь совершенным образом, что лучше это сделать невозможно, но вместе с тем с очень малым усилием привлечь внимание...»¹⁾).

Однако такая оценка «поучения» не имеет под собой реальной почвы, поскольку, как мы увидим, Ньютону была чужда не только идея превращения различных форм движения, но и идея сохранения движения. Высказанное Ньютоном положение по существу является началом возможных перемещений. Один из лучших знатоков великого творения английского ученого академик А. Н. Крылов, комментируя «поучение», писал, что в нем «можно видеть не только начало возможных перемещений, в его всеобъемлющем приложении к учению о равновесии машин..., но и сущность принципа Даламбера, лишь высказанную в столь сжатой форме, что нужен был гений Лагранжа, чтобы это общее начало выразить одною математической формулировкой, включающей в себя всю статику и динамику»²⁾).

Сводя все формы движения к механической, Ньютон нигде в своих сочинениях не ставил даже вопроса о возможности превращения механического движения в какие-либо иные, немеханические, формы. Более того, как это видно из его «вопросов», опубликованных в качестве приложения к «Оптике», он вообще считал возможным возникновение и уничтожение движения. Так, в одном из «вопросов» говорится: «Из различного сложения двух движений вполне ясно, что в мире не всегда имеется одно и то же количество движения... Движение может получаться и теряться. Но благодаря вязкости жидкостей, трению их частей и слабой упругости в твердых телах, движение более теряется, чем получается, и всегда находится в состоянии уменьшения... Мы видим, что разнообразие движений, которое мы находим в мире, постоянно уменьшается и существует необходимость сохранения и пополнения его посредством активных начал»³⁾). Такими

¹⁾ J. C. Maxwell, Theory of Heat, London, 1871, p. 91.

²⁾ А. Н. Крылов. Собр. соч., т. VII, стр. 56.

³⁾ И. Ньютон, Оптика, Гостехиздат, 1954, стр. 309.

активными началами Ньютон считал, например, силу тяготения. В подтверждение своего взгляда великий ученый приводил удар неупругих тел, полагая, что в этом случае имеет место уничтожение движения.

Мы видим, что у Ньютона не было полной ясности в вопросе о мере движения. Не находим мы у Ньютона и ответа на вопрос о том, какая из двух величин — количество движения *mi* или же «живая сила» *mi*² — должна быть взята в качестве меры движения. По-видимому, Ньютону была чужда сама идея о существовании некоторой сохраняющейся величины, отображающей факт сохранения механического движения. Подтверждением этого является его непоследовательность в трактовке закона сохранения количества движения. Сомневаясь в справедливости этого закона и допуская даже уничтожение движения, Ньютон вместе с тем считал, что постоянство количества движения может быть обеспечено некими «активными началами»¹⁾.

Понятие силы у Ньютона и Лейбница

Исторические корни законов сохранения ведут нас к знаменитому спору о двух мерах движения, истоки которого восходят к вопросу о том, что такое сила.

Понятие силы не было достаточно ясно ни Декарту, ни Гюйгенсу. Только Ньютон впервые вносит в это понятие определенную ясность. Согласно автору «Начал», «приложенная сила есть действие, произведенное над телами, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. Сила проявляется единственно только в действии и по прекращении действия в теле не остается»²⁾.

В дальнейшем тело продолжает удерживать свое состояние движения вследствие одной только инерции. Таким образом, движущее начало находится вне самой материи. С этой точки зрения можно было бы говорить об исчезновении и возникновении движения. Что касается материи, то ей присуща некая врожденная сила, которая проявляет себя в способности

¹⁾ См. В. А. Фабрикант, УФН, т. 70, в. 3, 1960.

²⁾ И. Ньютон, Начала, стр. 26.

материи сопротивляться внешним воздействиям. Эта «врожденная сила пропорциональна массе и если отличается от инерции массы, то только разве воззрением на нее»¹⁾).

Ньютоновская концепция врожденной силы является определенным шагом назад, так как, если уже Декарту было ясно, что в законе инерции содержится по существу утверждение о сохранении движения, то Ньютон фактически игнорирует этот факт. Эта концепция явилась одной из основных причин позднейших метафизических представлений о «невесомых флюидах», получивших широкое распространение в физике и химии XVIII в. Если сила есть нечто внешнее по отношению к материи, — рассуждали последователи Ньютона, — то можно вообще все многообразие явлений природы расчленить на отдельные области, в каждой из которых должны действовать свои собственные силы. Так вошли в науку различные «силы» — электрические, магнитные, жизненные, а известные в то время формы движения материи стали рассматриваться как особые «невесомые флюиды» (теплород, флогистон, электрический флюид и др.). Исследования различных форм движения материи в течение всего XVIII в. и первых десятилетий XIX в. пошли по этому метафизическому руслу и развивались независимо друг от друга. Отсутствие количественных методов исследования в то время также значительно способствовало распространению метафизических представлений.

Иной точки зрения на понятие силы придерживался современник Ньютона великий немецкий философ и математик Лейбниц. Изучив работы Гюйгенса и тщательно проанализировав его выводы, Лейбниц пришел к заключению, что «неверно будет сводить все многообразие природы к чистой механике. Подтверждение этого я вижу в основном законе природы, который состоит не в сохранении одного и того же количества движения, но в том, что необходимо сохранять одно и то же количество деятельной силы, и даже (для чего я открыл удивительное основание) одно и то же количество двигательной деятельности,

¹⁾ А. Н. Крылов, Собр. соч., т. VII, стр. 25.

которое означает совсем не то, что понимают картезианцы под количеством движения»¹⁾).

Лейбниц считал, что предложенная Декартом мера движения противоречит его же закону сохранения количества движения, так как при столкновении неупругих тел количество движения всегда уменьшается. Уже в первой своей работе, посвященной этому вопросу, озаглавленной «Краткое доказательство ошибки достопамятного Декарта и других касательно закона природы, благодаря которому бог желает сохранить всегда количество движения одним и тем же, но который совсем разрушает науку механики» и опубликованной в 1686 г. в лейпцигском журнале «Acta Eruditorum», он противопоставил декартовой мере mv гюйгенсово произведение mv^2 . Лейбниц считал, что истинной мерой движения является произведение массы на квадрат скорости движения тела. Свой вывод он основывал на результатах исследований Галилея, Гюйгенса и других ученых, из которых, в частности, следовало, что для подъема массы в одну единицу на учетверенную высоту требуется удвоенная скорость по сравнению со скоростью, которую необходимо сообщить в четыре раза большей массе при подъеме ее на единицу высоты. В обоих случаях необходимая для подъема сила будет одинакова.

В другой работе Лейбниц писал по поводу закона Декарта: «Мнение, что при столкновении тел сохраняется то же количество движения, господствовало долгое время и слыло у новых философов за аксиому. Теперь начинают в этом разубеждаться, особенно с тех пор, как мнение это оставлено наиболее старыми, наиболее искусными и значительными его защитниками... При этом впали в другую крайность и стали не признавать вовсе чего-либо абсолютного, способного занять место количества движения. Между тем ум требует этого, и оттого философы, не входящие в глубокие суждения математиков, с трудом, как я заметил, оставляют такую аксиому, как сохранение количества движения, не получая взамен ее другой, которой они могли бы придерживаться»²⁾).

¹⁾ G. Leibnitz, Mathem. Schriften, zweite Abt., Bd. II, S. 117, Halle, 1860.

²⁾ Там же, S. 215.

Свои идеи Лейбниц развивал и в последующие годы. В 1692 г. в сочинении «Опыт о динамике» он впервые вводит термин «живая сила» (*vis viva*), которым он заменил ранее применявшееся выражение «потенциальная сила» (*potentia force*). В более ранних механических работах Лейбниц противопоставлял также понятия *potentia mortua* и *potentia viva*. В 1695 г. в «Журнале ученых» (*Acta Eruditorum*) появилась его работа, в которой подробно рассматривался вопрос о двух мерах движения. Следуя Галилею, Лейбниц предлагает называть декартову меру движения «мертвой силой» (*vis mortua*), а предложенную им меру движения mv^2 — «живой силой» (*vis viva*). Согласно Лейбницу декартова мера является мерой сил, которые не производят движения, а обладают только стремлением к нему, в то время как произведение mv^2 является мерой сил, производящих движение. В качестве примера «мертвой силы» Лейбниц приводит давление покоящегося тела или стремление сжатой пружины принять первоначальную форму. Живая сила проявляет себя во всех движущихся телах.

Лейбниц высказывает также мысль об универсальности идеи Гюйгенса о постоянстве mv^2 : «Во вселенной всегда сохраняется одна и та же живая сила»¹⁾.

Из сказанного видно, что понятие силы у Лейбница по своему смыслу отлично от понятия силы у Ньютона. С точки зрения современных представлений Лейбниц понимал под термином «сила» то, что теперь называют энергией. Таким образом, хотя оба ученых и пользовались одним и тем же понятием «сила», но они вкладывали в него различный физический смысл. Сопоставлять непосредственно ньютоновское и лейбницевское понимание силы нельзя, однако можно сказать, что свое понимание силы немецкий философ связывает с вопросом о мере движения, и поэтому «сила» у него выступает как деятельное начало; Ньютон же понимал под силой некую внешнюю причину движения тел.

В. И. Ленин подчеркивал в своих «Философских тетрадах» указанную выше особенность понимания

¹⁾ G. Leibnitz, Mathem. Schriften, S. 36.

«силы» Лейбницем: «У Лейбница к понятию субстанции прибавляется понятие силы и притом действительной силы... Следовательно, Лейбниц через теологию подходил к принципу неразрывной (и универсальной, абсолютной) связи материи и движения»¹⁾.

Мы не имеем здесь возможности подробнее останавливаться на истории развития понятия силы²⁾. Следует, однако, отметить, что ньютоновская концепция силы противоречила идее сохранения движения, которая в рассматриваемый период в умах многих естествоиспытателей уже оформилась в принцип сохранения движения. Источником движения является само движение, которое либо сохраняет свою форму, либо превращается в другие формы. С этой точки зрения к понятию силы подходил Энгельс: «Когда какое-нибудь движение переносится с одного тела на другое, то, *поскольку движение переходит*, поскольку оно активно, его можно рассматривать как причину движения, *поскольку это последнее является переносимым*, пассивным, и в таком случае эта причина, это активное движение выступает как *сила*, а пассивное движение — как ее *проявление*. Согласно закону неумножимости движения отсюда само собой следует, что сила в точности равна своему проявлению, так как ведь в обоих случаях это *одно и то же движение*. Но переносящееся движение более или менее поддается количественному определению, так как оно проявляется в двух телах, из которых одно может служить единицей меры для измерения движения в другом. Измеримость движения и придает категории *силы* ее ценность. Без этого она не имеет никакой ценности»³⁾.

В учении Лейбница о живых и мертвых силах мы впервые встречаемся с утверждением о сохранении меры движения. Следовательно, Лейбниц идет дальше Декарта, так как по сути дела утверждение о постоянстве живой силы можно рассматривать как

¹⁾ В. И. Ленин, *Философские тетради*, Политиздат, М., 1965, стр. 67.

²⁾ См., например, M. Jammer, *Concepts of force. A study in the foundations of dynamics*, Cambridge, Mass., 1957.

³⁾ Ф. Энгельс, *Диалектика природы*, Госполитиздат, М., 1964, стр. 245.

эквивалент проблемы превращения одной формы движения в другую. Хотя сам Лейбниц и не выражал в такой общей форме всю проблему в целом, тем не менее он высказывает замечательные догадки на этот счет. Так, в одном из своих механических сочинений он говорил, что при неупругом ударе теряется живая сила, но эта потеря кажущаяся, так как при этом она поглощается мельчайшими частицами тел: «То, что поглощается мельчайшими атомами, не теряется безусловно для вселенной, хотя и теряется для общей силы сталкивающихся тел»¹⁾). Однако эти идеи Лейбница прошли незамеченными для его современников.

По всей вероятности, Лейбниц представлял себе, что если величина mv^2 является мерой количества механического движения, то вместе с тем она является мерой и всякого другого движения. Возможно, поэтому он упорно стремился доказать факт постоянства живой силы во всех известных ему явлениях²⁾).

Вне всякого сомнения учение Лейбница о постоянстве живой силы можно рассматривать как начало учения об энергии. Вместе с тем следует отметить, что учение о «силах» Лейбниц связывал со своей идеалистической философией, и поэтому оно носило определенный метафизический оттенок.

Оценивая заслуги Лейбница в развитии учения о сохранении движения, Б. И. Спасский пишет: «Заслугой Лейбница является то, что он в своеобразной форме вводит понятие энергии — живой силы — и отделяет его от понятия собственно силы, которую он называет мертвой силой. В развитии учения о сохранении движения в природе Лейбниц продвигается дальше своих предшественников. Однако то обстоятельство, что научные положения Лейбниц связывал со своей идеалистической философией и что понятию силы он придавал идеалистический метафизический смысл, не могло не оттолкнуть передовых ученых того времени..., а это препятствовало развитию самой идеи»³⁾).

¹⁾ Цит. по кн.: Ф. Розенбергер, История физики, ч. II, ОНТИ, М.—Л., 1933, стр. 25.

²⁾ P. Costabel, G. Leibnitz et la dynamique, Paris, 1960, p. 50 и сл.

³⁾ Б. И. Спасский, История физики, ч. I, Изд-во МГУ, 1963, стр. III.

Спор о мере движения.

Развитие теории «живых сил» у И. Бернулли

Выступление Лейбница против Декарта, поддержанное другими его единомышленниками, сразу же привело к возникновению спора, вошедшего в историю науки как спор о мере движения. По существу этот спор был разрешен лишь только в середине XIX в. после открытия закона сохранения и превращения энергии.

В течение многих десятков лет не утихали дебаты, втягивая в свою орбиту крупнейших представителей науки из многих стран Европы. Центральным в споре был вопрос о том, что считать в качестве меры движения: декартову меру — количество движения, или же живую силу Лейбница, иными словами, что следует понимать под словом «сила», поскольку с момента выступления Лейбница это понятие получило двоякое истолкование.

Защитники концепции Декарта — Кателан, Папен, Меранн и другие ученые, возражая Лейбницу, утверждали, что, учитывая время действия силы, следует признать истинной декартову меру. Ибо, говорили они, «двойная сила сообщает одному и тому же телу в одно и то же время двойную скорость»¹⁾. При этом они ссылались на законы движения Ньютона, в частности на второй закон, согласно которому сила измеряется количеством движения, исчезнувшим или появившимся за единицу времени. Не менее важным аргументом в защиту картезианских идей они считали и тот факт, что количество движения mv всегда остается постоянным, в то время как живая сила не только уменьшается при некоторых механических взаимодействиях, но может и вообще исчезать, как в случае удара «мягких», неупругих тел.

Точку зрения Лейбница поддерживала многочисленная группа ученых, среди которых были Вольф, Гравезанд, Мушенбрек, Эйлер, Рихман, И. Бернулли, Д. Бернулли и ряд других. Особенно следует отметить работы Иоганна Бернулли, в которых лейбни-

¹⁾ Цит. по кн.: М. Планк, Принцип сохранения энергии, ГОНТИ, М. — Л., 1938, стр. 19.

цевская идея живых сил получила дальнейшее развитие и обоснование.

В 1724 г. Парижская Академия наук объявила конкурс на лучшее сочинение, посвященное теории удара. Среди других была представлена работа под названием «Рассуждение о законах передачи движения», автором которой являлся И. Бернулли. Вся она посвящена защите и пропаганде лейбницевских идей. Бернулли говорит здесь прямо, что в проблеме движения наиболее важным является понятие живой силы: «В течение долгого времени держались убеждения, что количество движения, т. е. произведение массы тела на скорость, является мерой силы этого тела. Ошибочно полагать, что во вселенной обязательно сохраняется всегда одно и то же количество движения. Происхождение этого заблуждения... от того, что смешивали природу мертвых сил с природой живых сил... Первым, кто заметил, что эта сила вовсе не равна произведению массы на скорость, а что ее мерой является произведение массы на квадрат скорости, был Лейбниц»¹⁾).

Бернулли останавливается на доводах, которые приводились Лейбницем в защиту своей точки зрения, и доводах его противников. В частности, он упоминает ссылки Лейбница на исследования Галилея, его рассуждения относительно того, что высоты, на которые весомые тела способны подниматься, всегда пропорциональны квадратам их скоростей, и вывод Лейбница, что «высота, на которую может подняться тело, может быть принята за меру силы этого тела», и что, следовательно, живая сила пропорциональна массе, умноженной на квадрат ее скорости.

«Противники Лейбница, — продолжает Бернулли, — не приняли его положения относительно высот, являющихся, по его утверждению, мерой сил. Они отыскивали новые доводы и утверждали, между прочим, что нельзя пренебрегать временем, которое тело употребляет, чтобы пройти высоту, на которую оно поднимается. Эти господа полагали, что они имеют основание поддерживать то мнение, что при оценке

¹⁾ И. Бернулли, Избранные сочинения по механике, М. — Л., 1937, стр. 99.

силы нужно обращать внимание не только на высоту, но также и на время... Лейбниц на эти возражения ответил, но ему не удалось разубедить эти предубежденные умы в их простоватом и ошибочном мнении о том, что сила движущихся тел равна якобы их количеству движения, т. е. пропорциональна произведению их масс на их скорости. Тщетно он доказывал своим противникам, что если бы мнение, которое они поддерживали, было справедливо, то можно было бы выполнить чисто механическое вечное движение, что, по мнению Лейбница, совершенно невозможно; его противники предпочитали допустить возможность искусственного вечного движения, чем отбросить мнение, давно ими усвоенное, и последовать новому мнению, которое они рассматривали как нечто вроде ереси в физике»¹⁾).

Причину такого упорства Бернулли видит в том, что доказательства Лейбница являются «недостаточно сильными, чтобы решиться принять его взгляд». Лично про себя он говорит, что «лишь после длительного и серьезного размышления я нашел, наконец, средство убедить самого себя при помощи прямых доказательств, стоящих выше всех возражений». Эти прямые доказательства Бернулли нашел при исследовании различных случаев удара тел. В результате этих исследований он формулирует общее положение о сохранении живых сил: «Сумма живых сил нескольких тел, взятых в любых направлениях, по которым эти тела движутся, не меняется от действия тел друг на друга»²⁾).

К вопросу о живых силах Бернулли возвращается и в дальнейшем. Так, в 1735 г. появляется его сочинение «Об истинном значении живых сил и их применении в динамике», в котором углубляются понятие живой силы и закон ее сохранения: «Живая сила состоит не в действительной работе, а в способности к действию: она существует и тогда, когда не действует и когда не имеет объекта, на который она могла бы действовать. Так, например, натянутая пружина или же, скажем, тело с установившимся

¹⁾ И. Бернулли, Избранные сочинения по механике, стр. 100—101.

²⁾ Там же, стр. 105.

движением имеют в себе способность к действию, хотя бы вне их и не было ничего такого, на чем они могли бы проявить эту способность... Живая сила... имеет определенную величину, из которой ничего не может пропасть без того, чтобы мы снова не нашли эту потерю в произведенном действии. Отсюда само собой вытекает, что живая сила всегда сохраняется, так что живая сила, находившаяся до действия в одном или нескольких телах, теперь, после действия, обязательно встретится нам в другом теле или в других нескольких телах, если только она не останется неизменной в прежних телах»¹⁾).

Интересно отметить, что Бернулли придает очень большое значение принципу сохранения живых сил в природе, считая, что если «величина живых сил, единственный источник непрерывности движения в природе, не могла бы быть сохранена, и, следовательно, не было бы равенства между действующей причиной и ее результатом», то «вся природа впала бы в беспорядочное состояние»²⁾). Нельзя не отдать дань восхищения ученому, читая эти строки, написанные более чем за столетие до открытия закона сохранения и превращения энергии.

Исследования И. Бернулли явились важным этапом на пути к открытию закона сохранения и превращения энергии. Эти исследования способствовали тому, что многие приверженцы картезианских идей поняли свою ошибку и, по выражению Бернулли, «отбросив предубеждения, тотчас же перешли на нашу сторону».

Следует отметить, что защитники теории «живых сил» не только развивали идеи Лейбница. Они прилагали максимум усилий для того, чтобы на конкретных примерах из различных областей механики и физики показать плодотворность этих идей в решении конкретных задач. Например, Германн, ученик Якова Бернулли, живший в этот период в Петербурге и работавший в только что организованной Академии наук, опубликовал несколько сочинений, в которых

¹⁾ И. Бернулли, Избранные сочинения по механике, стр. 219—221.

²⁾ Там же, стр. 132.

показал плодотворность теории «живых сил» применительно к решению различных механических задач.

Даниил Бернулли, сын Иоганна Бернулли, широко пользовался теорией «живых сил» в своих исследованиях по гидродинамике. Хотя он и не внес принципиально нового в развитие этой теории, тем не менее заслуживают внимания некоторые из его высказываний. Так, он отмечает, что сохранение «живых сил» является важнейшим началом механики: «Поразительно, до какой степени полезно это положение в механической философии, на что правильно обратил внимание именно мой отец, указавший на него в различных работах...»¹⁾. Интересно заметить, что вместо «сохранения живых сил» Д. Бернулли говорит о «равенстве между действительным опусканием и потенциальным подъемом», что означает одно и то же, «но оно, быть может, будет более приемлемым для некоторых философов, которых смущает само название живая сила»²⁾.

Интересны догадки Д. Бернулли о возможности превращения механического движения в иные формы движения: «Хотя упомянутое выше начало (сохранение живых сил. — Я. Г.) является всеобщим, тем не менее его не следует применять без всякой оглядки, так как зачастую случается, что движение переходит к материи другого рода»²⁾. В качестве примера он приводил неупругий удар, «когда часть живых сил, затраченная на сжатие, не восстанавливается в телах, но остается приставшей к некоей тонкой материи, к которой она переходит»³⁾.

В рассматриваемом споре принимали участие и многие другие физики и философы — Даламбер, Вольтер, Кант. Последний, например, посвятил ему одно из своих первых сочинений «Мысли о правильной оценке живых сил» (1746 г.).

Остановимся еще на одном, сравнительно малоизвестном эпизоде из истории спора о мере движения, разыгравшемся в стенах молодой Петербургской

¹⁾ Д. Бернулли, Гидродинамика, Изд-во АН СССР, М.—Л., 1959, стр. 28.

²⁾ Д. Бернулли, Гидродинамика, стр. 28.

³⁾ Там же, стр. 29.

Академии наук, членами которой состояли в то время многие из упомянутых выше ученых (Д. Бернулли, Эйлер, Германн и др.). Этот эпизод интересен для нас также и в том отношении, что показывает, какую прогрессивную роль играла наука в России еще на заре своего существования. Благодаря публикации многих интересных архивных документов, собранных в сборнике трудов Рихмана¹⁾, можно проследить одну из страниц истории русской науки.

Уже вскоре после создания Петербургской Академии наук (1725 г.) один из ее первых академиков Бюльфингер выступил с работой на тему «Механические доказательства о силах, присущих движущемуся телу, и о мере этих сил» (1726 г.), в которой защищалась лейбницевская теория живых сил. Точку зрения Бюльфингера поддержали И. Бернулли и Германн. В двадцатых годах XVIII в. дискуссия на эту тему прошла сравнительно гладко. В сороковых годах петербургские академики были вновь вовлечены в этот спор. На этот раз поводом к нему послужил памфлет английского математика и врача Джюрина, члена Лондонского Королевского общества, под названием «Рассуждение о сохранении живых сил», опубликовавшего его под псевдонимом «Филелейтер» (Свободолюбец). В этом памфлете автор в полемической и зачастую грубой форме нападал на защитников концепции Лейбница, главным образом на И. Бернулли и его сына Даниила. Джурин, в частности, писал: «Прошло уже немало лет, как некоторые швейцарские философы, обладающие великой опытностью в математике и столь же великой, как их опытность, славой, выступили на сцену с новым всеобщим принципом механики. Они называют его принципом сохранения живых сил. Эти так называемые силы пропорциональны произведениям массы тел на квадрат их скоростей. Сумма же этих сил, по их мнению, никогда не меняется при взаимном действии тел друг на друга и всегда остается той же... Охотно сознаюсь, что имеется много случаев взаимодействия тел, в которых при помощи этого принципа ты можешь достигнуть цели

¹⁾ Г. В. Рихман, Труды по физике, Изд-во АН СССР, 1956.

не только надежно, но и легко... Но, заявляю я, гораздо важнее, что существует бесконечно много случаев, когда указанный принцип введет тебя в заблуждение»¹⁾).

Далее Джюрин рассматривает многочисленные примеры из области гидравлики, которые, по его мнению, приводят к противоречию с принципом сохранения живой силы. Джюрин стремится доказать, что ньютоновское понятие силы не противоречит никаким механическим явлениям, в то время как лейбницевское понятие живой силы противоречит многим из них. Автор приходит к выводу, что «ньютонианская сила остается постоянной во всех телах, которые либо существуют в природе, либо рассматриваются математиками... Лейбницевская сила в значительной мере происходит при ударе всех движущихся тел и никогда не остается постоянной, за исключением тел совершенно упругих, каковые вовсе не встречаются в природе; истинными живыми силами, если угодно пользоваться этим наименованием, являются силы ньютоновские, т. е. те, которые пропорциональны массам и скоростям»²⁾).

Брошюра Джюрина поступила на отзыв Рихману, который после подробного ознакомления с ней отметил, что «Филелейтер из Лондона не отличает хорошо живые силы от мертвых..., выдумывает явления и из них выводит следствия, притом такие, которые чаще всего не уничтожают принцип сохранения живых сил»³⁾. Показывая полную несостоятельность всех доводов Джюрина, Рихман в заключение своего отзыва язвительно замечает, что «идеи Филелейтера расходятся с мыслью лейбницеанцев и великого Лейбница, который, конечно, служит таким же украшением Германии, каким Ньютон Англии, и чью славу последующие поколения уберегут от той гибели, которой тщетно угрожают сатирические писания Филелейтера, подверженные сами этой опасности, быть может, в большей мере»⁴⁾).

1) Г. В. Рихман, Труды по физике, стр. 468.

2) Там же, стр. 484.

3) Там же, стр. 432.

4) Там же стр. 443.

Рихмановская оценка памфлета Джюрина встретила возражение со стороны академика Вейтбрехта, который выступил в его защиту. Между Рихманом и Вейтбрехтом возникла острая полемика, в ходе которой обе стороны не пришли ни к какому согласию. Тогда Академическая Конференция в своем специальном решении от 4 марта 1745 г. постановила: «О статьях почтенных мужей Вейтбрехта и Рихмана, написанных по поводу сочинения некоего англичанина Филелейтера о сохранении живых сил, академики решили все дело представить на суд опытейшего в этом роде наук мужа, знаменитейшего Эйлера»¹⁾. Соответствующие материалы были посланы в апреле того же года Эйлеру, проживавшему тогда в Берлине.

Ответ от прославленного математика пришел в конце года. В нем Эйлер сообщал, что, как он установил, памфлет принадлежит Джюрину, прикрывавшемуся псевдонимом Филелейтер, и что он не знает, что больше стоит «порицать в оной книжечке Филелейтера, — высшее ли коварство в сочетании с невероятной смелостью, или же величайшее и грубейшее невежество в том предмете, о котором идет речь»²⁾.

Эйлер легко доказывает ошибочность всех гидравлических расчетов Джюрина и заключает: «Вот почему я не могу надивиться тому, с каким бесстыдством этот автор осмелился упрекать в ошибках и опорочивать глубочайшие решения преславного Бернулли, которые согласны не только с истинными принципами теории, но и с опытами»³⁾.

Какова оценка роли этого спора в истории развития законов сохранения? Высказывания на этот счет стали появляться еще с середины XVIII в. Одним из первых изложил свою точку зрения французский математик и философ Даламбер в трактате «Динамика». Подробно останавливаясь на причинах возникновения спора, он отмечает, что формально обе меры движения эквивалентны, если живую силу отнести к единице пути, а мертвую — к единице времени, так как тогда $f = \frac{mv}{t} = \frac{mv^2}{2s}$. При этом сила трактуется Да-

1) Г. В. Рихман, Труды по физике, стр. 671—672.

2) Там же, стр. 494.

3) Там же, стр. 495.

ламбером в духе Ньютона. Интересно отметить оригинальную мысль ученого относительно связи механических принципов со свойствами пространства и времени, высказанную в связи с рассматриваемым вопросом: «Нельзя сравнивать между собой две вещи различной природы, какими являются пространство и время, но можно сравнивать отношение частей времени с отношением частей пройденного пространства. Время по своей природе течет равномерно, и механика исходит из этой равномерности»¹⁾).

Мнение Даламбера таково, что этот спор совершенно бесполезен для механики, поскольку с учетом пространственно-временных отношений обе меры оказываются эквивалентными: «Нужно каждому предоставить свободу решать данный вопрос по его усмотрению. К тому же затронутый вопрос представляет собой не более как совершенно бесплодный метафизический спор о словах, недостойный внимания философов»²⁾).

Хотя Даламбер и претендовал на роль верховного арбитра в данном вопросе, его рассуждения не внесли ясность в существо спора, прежде всего потому, что французский математик сам не представлял себе истинную причину существования двух мер механического движения. Спор не мог быть решен в рамках науки XVIII в. потому, что он велся только с точки зрения количественного рассмотрения механического движения. Качественная сторона этого вопроса еще только намечалась смелыми догадками Лейбница и Д. Бернулли. Только после того, как был открыт закон сохранения и превращения энергии и четко оформилось само понятие «энергия», существо вопроса выяснилось окончательно.

Глубокому анализу спора о мере движения посвятил страницы своего труда «Диалектика природы» Ф. Энгельс. Вот что он писал по этому поводу: «...Казалось бы, что не может все же целиком сводиться к бесполезному спору о словах спор, начатый таким мыслителем, как Лейбниц, против такого мыслителя, как Декарт... И действительно, как согласовать, что

¹⁾ Даламбер, Динамика, Гостехиздат, М.—Л., 1950, стр. 19.

²⁾ Там же, стр. 27.

движение имеет две противоречащие друг другу меры, что оно оказывается пропорциональным то скорости, то квадрату скорости?» После детального рассмотрения различных случаев взаимопревращения механической энергии и других форм энергии Энгельс заключает: «Таким образом, мы находим, что механическое движение действительно обладает двоякой мерой, но убеждаемся также, что каждая из этих мер имеет силу для весьма определенно отграниченного круга явлений. Если имеющееся уже налицо механическое движение переносится таким образом, что оно сохраняется в качестве механического движения, то оно передается согласно формуле о произведении массы на скорость. Если же оно передается таким образом, что оно исчезает в качестве механического движения, воскресая снова в форме потенциальной энергии, теплоты, электричества и т. д., если, одним словом, оно превращается в какую-нибудь другую форму движения, то количество этой новой формы движения пропорционально произведению первоначально двигавшейся массы на квадрат скорости. Одним словом: mv — это механическое движение, измеряемое механическим же движением; $mv^2/2$ — это механическое движение, измеряемое его способностью превращаться в определенное количество другой формы движения...

Таким образом, ясно, что спор Лейбница с картезианцами отнюдь не был простым спором о словах и что Даламбер по существу ничего не разрешил своим «суверенным решением». ...И действительно, в этом вопросе должна была оставаться неясность, пока не знали, что делается с уничтожающимся как будто механическим движением»¹⁾).

Об этом знаменитом споре неоднократно писали и в последующие годы многие выдающиеся физики. Например, Планк в своей известной книге «Принцип сохранения энергии» говорит, что «с нашей современной более строгой физической точки зрения, точно различающей силу от работы, мы должны, естественно, весь спор объявить чисто словесным; ибо о существенном расхождении можно говорить только тогда, когда при-

¹⁾ Ф. Энгельс, Диалектика природы, Госполитиздат, 1964, стр. 77.

ходят к единому определению понятия, о котором идет речь, — понятия, с самого начала совершенно произвольного. Пока, стало быть, со словом сила не связывали какого-либо ясного представления, спор о мере сил был совершенно беспредметным.

Но вместе с тем нельзя не признать, что в основе... спора все же лежало более глубокое содержание; ибо по существу обе партии, — хотя это и высказывалось лишь случайно и неотчетливо, — до известной степени были едины в том, что следует понимать под словом «сила». И Декарт и Лейбниц, несомненно, имели представление, хотя, быть может, и не совсем точное, о существовании принципа, высказывающего неизменность и неуничтожимость того, из чего возникает всякое движение и действие в мире. Если Декарт основывал справедливость этого принципа на теологических рассуждениях, которые базировались на вечности творца, то Лейбниц исходил из закона причины и действия. Причина может произвести лишь такое действие, которое ей в точности соответствует, не больше и не меньше. Стало быть, в непрерывной цепи причин и действий, которые образуют явления мира, не может иметь место какое-либо возрастание или уменьшение: есть нечто, что остается постоянным. Если мы это нечто назовем силой, то мы получим некоторое, хотя и весьма несовершенное представление об общем исходном пункте в понятии силы у обеих различных точек зрения. Поэтому вполне было возможно различие мнений по поводу того, является ли истинной мерой этого понятия декартово количество движения или живая сила Лейбница. Если бы спор велся в этой несколько более точной форме, то Лейбниц был бы прав»¹⁾.

Нельзя не согласиться с мнением Планка, что в основе спора лежало более глубокое содержание, чем простой спор о словах. И поэтому неправ М. Лауэ, утверждая, что «вся дискуссия имела дело с фиктивной проблемой, вызванной неясностью в понимании слова сила»²⁾. Если и можно говорить об бессодержа-

¹⁾ М. Планк, Принцип сохранения энергии, 1938, стр. 20—21.

²⁾ М. Лауэ, Инерция и энергия, УФН, т. 67, в. 4, 1960, стр. 726.

тельности спора о двух мерах движения, то только в том смысле, что обе меры — и «живая сила», и количество движения — оказались одинаково важными не только для механики, но и для физики вообще. Принципиальное значение спора о мере движения состоит в том, что он способствовал развитию представлений о важнейших характеристиках механического движения, способствовал формированию таких понятий, которые в достаточно полной мере отразили известные факты, относящиеся к сохранению механического движения.

Несмотря на более глубокие идеи Лейбница, его точка зрения на сущность «сил» не получила широкого распространения. Именно ньютоновская концепция силы была доминирующей в XVIII в. Она же определила развитие физики вплоть до открытия закона сохранения и превращения энергии в середине XIX в. Такое положение вещей явилось следствием не только огромного авторитета Ньютона как физика, хотя и это имело место. Были другие причины более общего характера. Дело в том, что спор о мере движения не был чем-то изолированным от важнейших физических проблем, волновавших умы крупнейших представителей математического естествознания рассматриваемой эпохи. Этот спор был по существу лишь частью центрального пункта идейных разногласий в физике XVIII в., касающихся вопроса о природе сил. В течение длительного времени естествоиспытатели стремились разработать такую картину взаимодействия, которая исключала бы действие на расстоянии. Хотя сам Ньютон не занимал четко выраженную позицию по этому вопросу, его последователи пошли гораздо дальше и возвели дальнодействие в абсолют. Изобретение различных дальнодействующих сил и их вещественных носителей вроде электрического и магнитного флюидов было вполне в духе ньютонианцев. Укреплению ньютоновского понимания силы способствовало также значительное усиление эмпиризма в физике XVIII в. с его тенденцией формального описания физических явлений, без проникновения в их механизм¹⁾.

¹⁾ См. Б. Г. Кузнецов, Принципы классической физики, Изд-во АН СССР, 1958.

Следует отметить, что Э. Мах и его последователи стремились в своих работах исказить тот исторический факт, что в физике XVIII в. преобладающее распространение получила ньютоновская, а не лейбницевская концепция силы. Они пытались дать этому факту чисто субъективистское истолкование, сводя все дело к ничтожной случайности и особенности склада мышления Галилея.

Галилей, исследуя законы падения тел, отверг казавшееся очевидным допущение, что скорость пропорциональна пройденному телом пути, и заменил его менее очевидным положением о пропорциональности скорости падающего тела времени падения. В правильности этого предположения он убедился, сравнив вытекающие из него следствия с экспериментом. «Именно этому ничтожному историческому обстоятельству, — писал Мах, — следует приписать то, что понятие работы с таким трудом, столь постепенно приобрело современное свое значение. В самом деле, вследствие того, что зависимость между скоростью и временем была случайно найдена раньше, соотношение $v = gt$ должно было показаться первоначальным уравнением, $h = \frac{gt^2}{2}$ — ближайшим и уравнение $gh = \frac{v^2}{2}$ — более отдаленным следствием. С введением понятия массы m и силы P (причем $P = mg$) получается $mv = Pt$; $mh = \frac{Pt^2}{2}$, $Ph = \frac{mv^2}{2}$, т. е. основные уравнения механики.

Таким образом, понятия силы и количества движения (mv) должны были показаться первоначальнее, чем понятия работы (Ph) и живой силы (mv^2). Нет поэтому ничего удивительного в том, что везде, где появлялось понятие работы, делались попытки заменить его понятнее исторически более старым. В этом именно находит свое полное объяснение весь спор между последователями Лейбница и Декарта... Если бы падение тел исследовал Кеплер, не останавливавшийся и перед сложными допущениями..., ход развития динамики оказался бы существенно иным»¹⁾.

¹⁾ Э. Мах, Принцип сохранения работы, история и корень его, СПб., 1909, стр. 57.

Став на такую точку зрения, Мах не только не сумел правильно поставить вопрос о соотношении форм движения, но и исказил всю проблему в целом, сведя ее к чистой случайности.

Законы сохранения в механике Галилея — Ньютона и их связь со свойствами пространства и времени

Установление связи между свойствами пространства и времени и законами сохранения, которая была в полном объеме выявлена физикой XX в., явилось закономерным развитием идей, в скрытой форме уже содержащихся в принципах классической механики Галилея — Ньютона. Безусловно прав Е. Вигнер, когда говорит, что «вопросы симметрии и инвариантности и даже законы сохранения, несомненно, играли важную роль в мышлении физиков предыдущих поколений, начиная с Галилея и Ньютона и, возможно, еще раньше»¹⁾.

В своих исследованиях свойств механического движения Галилей рассматривал пространство и время как объективные реальности, существующие независимо от человеческого сознания. Именно такой вывод следует из анализа всего его научного творчества как в области механики, так и в области астрономии, в частности, из его борьбы за победу коперниканского учения. При этом Галилей широко пользовался конкретными и наиболее общими свойствами пространства и времени. Открытый им принцип относительности движения показал, что пространство должно обладать свойствами однородности и изотропности.

Дальнейшее развитие пространственно-временные представления получают в работах Ньютона. Основу этих представлений составляет также признание пространства и времени как объективных реальностей. Пространство и время абсолютны в том смысле, что свойства пространства не зависят от движущихся в нем тел и протекающих механических явлений, а абсолютный характер времени проявляется в независи-

¹⁾ Е. Вигнер, Симметрия и законы сохранения, УФН, т. 83, в. 4, 1964, стр. 728.

мости его также и от свойств движущейся материи. Таким образом, пространство в механике Ньютона выступает лишь как некая арена, на которой разыгрываются механические явления, и как вместилище движущейся материи. При этом пространство и время совершенно не взаимосвязаны.

Неизбежным следствием динамических законов Ньютона явилось признание однородности и изотропности пространства и времени. Уже в механических концепциях Лейбница проскальзывала мысль о том, что свойства физического пространства таковы, что отдельные его части неразличимы. Этим фактом, в частности, Лейбниц аргументировал свои возражения в споре о мере движения с картезианцами. Но только у Ньютона в явной форме говорится о том, каковы должны быть свойства реального пространства и времени. В «поучении» к основным определениям динамических понятий Ньютон пишет, что «совершенно невозможно ни видеть, ни как-нибудь иначе различить при помощи наших чувств отдельные части этого пространства одну от другой, и вместо них приходится обращаться к измерениям, доступным чувствам»¹⁾. Свойство же времени таково, что «течение абсолютно-го времени изменяться не может. Длительность или продолжительность существования вещей одна и та же, быстры ли движения (по которым измеряется время), медленны ли или их совсем нет...»²⁾.

Сформулировав основные свойства пространства и времени, Ньютон только после этого дает определения своих законов движения, словно подчеркивая тем самым, что эти законы нужно рассматривать как выражение указанных свойств того физического пространства, в котором рассматривается движение.

Нетрудно видеть, что действительно законы Ньютона неизбежно требуют признания свойств однородности и изотропности пространства и времени. Это следует хотя бы из того, что второй закон Ньютона инвариантен относительно преобразований Галилея, и, таким образом, он не связан с какой-либо конкретной системой

¹⁾ И. Ньютон, Математические начала натуральной философии, стр. 32.

²⁾ Там же.

отсчета. А это означает эквивалентность всех точек пространства, т. е. его однородность.

С другой стороны, согласно первому закону движения — закону инерции — в отсутствие внешних сил тело будет сохранять свое состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения, т. е. оно не получает ускорения ни в какую сторону. Все направления оказываются равновозможными. Отсутствие избранных направлений в пространстве означает, что пространство обладает свойством изотропности. К такому же заключению приводит и второй закон движения: ускорение всегда пропорционально силе независимо от направления этой силы в пространстве и всегда направлено в сторону действия силы.

По отношению ко времени свойство однородности означает, что течение времени равномерно и что законы механики не изменяют своего вида со временем. Это же означает возможность произвольного выбора начала отсчета времени. Изотропность времени следует из того, что законы механики оказываются инвариантными по отношению к перемене знака времени.

Свойства пространства и времени налагают определенные ограничения и на следствия из законов движения. В частности, живая сила должна быть пропорциональна квадрату скорости, а количество движения — первой степени скорости ¹⁾. Следует также ожидать определенной связи между законами сохранения живой силы и количества движения и свойствами пространства и времени, которая действительно существует, как это будет показано далее.

Итак, законы движения классической механики Галилея — Ньютона и следствия из них находятся в непосредственной, хотя и скрытой, связи со свойствами однородности и изотропности пространства и времени. Естественно, что ни Галилей, ни Ньютон, так же как и другие ученые рассматриваемого периода, этой связи не видели. Для подобных широких обобщений почва созрела только в XX в.

¹⁾ См. В. Паули в сб.: «Современные проблемы физико-химии», М., 1938, стр. 23.

Принцип исключенного вечного двигателя

С историей развития законов сохранения тесно связан вопрос о возможности устройства такой машины, которая, будучи раз приведена в движение, в дальнейшем двигалась бы непрерывно сама по себе, никогда не останавливаясь. Такая машина совершала бы полезную работу без затраты энергии извне.

В древности мы не встречаем каких-либо попыток создать подобную машину. По-видимому, идея вечного двигателя тогда не являлась актуальной проблемой, поскольку огромная армия рабов давала почти даровую рабочую силу, что вполне удовлетворяло нужды общества того времени.

Первые проекты вечного двигателя относятся к периоду раннего средневековья, к XIII в. В 1269 г. Пьер де Марикур (Петр Перегрин) в своем трактате «Послание о магните Пьера де Марикур, по прозванию Перегрин, к рыцарю Сигеру де Фукокур» описал проект «непрерывно движущегося колеса», основанного на действии магнитов. Интересно отметить, что сам автор проекта указывает на то, что у него в этом деле были предшественники, также пытавшиеся построить вечный двигатель: «Многих я видел, искавших его ощупью и изнуравших себя многообразным трудом. Не примечали они, что достичь этого великого умения можно благодаря силе или способности нашего камня (магнита. — Я. Г.)»¹⁾. Марикур не называет этих изобретателей, но имя одного из них история сохранила. Это был французский архитектор Виллар д'Оннекур, который предложил в 1245 г. проект колесного вечного двигателя²⁾.

В последующие столетия, особенно в период между XIII и XVII вв., было предложено огромное количество проектов вечного двигателя, основанных на применении различных физических явлений и законов (закон Архимеда, нарушение принципа равновесия, капиллярные явления, магнетизм и т. д.). В то время

¹⁾ Пьер де Марикур, Послание о магните. Труды Института истории естествознания и техники, т. 22, 1959, стр. 312—313.

²⁾ А. И. Краснов, Возможен ли вечный двигатель? М., 1956.

не только люди, далекие от науки, но и ученые верили в возможность такого двигателя, так же как считали возможным найти философский камень. Однако все усилия оказывались бесплодными, и ни один из проектов не был осуществлен. Двигатель упорно отказывался быть «вечным».

В XVIII в. число проектов значительно сократилось. По-видимому, многие изобретатели поняли тщетность своих попыток и отказались от них. И все же проектов поступало еще достаточно много. На их рассмотрение научные учреждения того времени вынуждены были отвлекать значительное число ученых, поскольку авторы проектов требовали их подробного разбора и заключения. В конце концов одно из наиболее авторитетных учреждений — Парижская Академия наук — в 1755 г. объявило, что заявления о вечном двигателе, квадратуре круга и философском камне к рассмотрению приниматься не будут.

Конечно, понять причину неудач всех попыток сконструировать вечный двигатель ученые XVIII в. еще не могли. Это стало ясно только после открытия в середине XIX в. закона сохранения и превращения энергии. Тем не менее представляет интерес тот факт, что уже в XVI—XVII вв. некоторые ученые не только высказывали категорическое утверждение о невозможности вечного двигателя, но и пытались научно обосновать его. Такие утверждения мы находим у Джироламо Кардано, у Иоганна Кеплера, у Леонардо да Винчи. Последний, например, в сочинении «О ложных науках» писал, что ни одно тело не может за счет своего движения «подняться на высоту, не только большую той, с которой оно упало, но даже равную ей». Обращаясь непосредственно к авторам проектов вечного двигателя, он восклицал: «О искатели постоянного движения, сколько пустых проектов создали вы в подобных поисках! Прочь идите к искателям золота!»¹⁾. В конце XVII в. механик Яков Лейпольд, используя законы равновесия рычагов, простым расчетом доказал невозможность колесных вечных двигателей. Именно этот тип вечного двигателя чаще всего встречался в различных проектах.

¹⁾ Леонардо да Винчи, Избранное, М., 1952, стр. 183.

Уже упоминалось о том, что такие ученые, как Галилей, Гюйгенс, Лейбниц, использовали в своих механических исследованиях отрицательный результат поисков вечного двигателя как некую аксиому. Метод доказательства путем «приведения к вечному двигателю — что невозможно» играл в данном случае такую же роль, как у математиков метод приведения к абсурду. Таким путем было доказано много важных положений механики. Этот метод можно назвать методом исключенного вечного двигателя. В частности, Галилей его использовал для доказательства положения о том, что твердое тело, помещенное в жидкость равной ему плотности, будет находиться в равновесии. Этим же методом он доказывал также и положение о том, что скорость тела при свободном падении зависит только от расстояния между начальным и конечным положениями тела. Методом Галилея воспользовался Торричелли для обоснования своего закона истечения тяжелой жидкости из отверстия в стенке сосуда. В основу этого доказательства было положено допущение, что вытекающая из отверстия в сосуде жидкость не может подняться выше ее уровня в сосуде. При этом истечение жидкости рассматривалось как аналог свободного падения тяжелого тела. Отсюда Торричелли пришел к выводу, что скорость истечения должна быть пропорциональна корню квадратному из высоты уровня жидкости в сосуде, т. е. $v = A\sqrt{h}$, где h — высота. Спустя почти сто лет Д. Бернулли показал, что $A = \sqrt{2g}$ и $v = \sqrt{2gh}$.

Классическим образцом применения метода исключенного вечного двигателя является вывод условия равновесия тела на наклонной плоскости, предложенный Стевиным в сочинении «Статика или начала равновесия». Вот ход его рассуждений: рассмотрим наклонную плоскость в виде треугольника с горизонтальным основанием, у которого одна из боковых сторон в два раза длиннее другой, и поместим на этот треугольник цепь, состоящую из четырнадцати шаров. Четыре шара расположатся на более длинной боковой стороне, два на более короткой, а остальные восемь будут свешиваться под основанием. Рисунок этого треугольника с цепью, украшающий титульный лист сочинения

Стевина, сопровождается надписью «Чудо и не чудо». Если бы вес четырех шаров не уравнивался весом двух других, то цепь сама собой пришла бы в движение, которое продолжалось бы вечно, что является абсурдом. Поэтому, — заключает Стевин, — для равновесия двух связанных между собой тел, лежащих на наклонных плоскостях равной высоты, необходимо, чтобы их веса относились между собой как длины наклонных плоскостей. Этот вывод дал Стевину возможность установить и другие закономерности равновесия тел на наклонной плоскости. Подобным образом Стевин доказал и ряд теорем гидростатики.

Принципом исключенного вечного двигателя широко пользовались физики и механики в XVIII и первой половине XIX в.

В 1783 г. выходит в свет сочинение известного французского математика и государственного деятеля Лазаря Карно под названием «Опыт о машинах вообще», где утверждается, что вечный двигатель построить нельзя потому, что вследствие трения самая совершенная машина, раз приведенная в движение и предоставленная сама себе, неизбежно остановится. В этом же сочинении Карно предлагает оценивать полезное действие машины по величине исчезнувшей «живой силы».

Неудачи в осуществлении проектов вечного двигателя имели большое значение в истории науки. Это, пожалуй, один из немногих примеров в какой-то степени парадоксального факта: невозможность решения чисто технической задачи стимулировала прогресс науки. Планк говорит по этому поводу, что проблема изобретения вечного двигателя имела «для физики такое же важное значение, какое имели для химии попытки искусственного получения золота. В обоих случаях для науки оказались полезными не положительные, а отрицательные результаты опытов»¹⁾.

После исследований И. Бернулли к принципу сохранения «живых сил» стали обращаться многие выдающиеся математики и механики XVIII в. — Эйлер, Даламбер и некоторые другие. Но в трудах этих уче-

¹⁾ М. Планк, Физические очерки, ГИЗ, М.—Л., 1925, стр. 10.

ных указанный принцип еще не фигурировал в качестве одного из важнейших законов механического движения. Только в 1788 г. Лагранж в своем классическом курсе «Аналитическая механика» дал доказательство «теоремы живых сил», исходя из общих законов движения. Среди четырех основных принципов динамики он на первое место ставит принцип сохранения «живых сил». Говоря о принципе Даламбера, Лагранж приходит к выводу, что полученная на основе этого принципа формула «непосредственно приводит к общим уравнениям, в которых содержатся принципы или теоремы, известные под названием принципов сохранения живых сил, сохранения движения центра тяжести, сохранения моментов вращения, или принципа площадей, и принципа наименьшего действия. Однако все эти принципы следует рассматривать скорее как общие выводы из законов динамики, чем как первоначальные принципы этой науки...»¹⁾.

Лагранж отмечает, что принцип «живых сил» имеет большое преимущество перед остальными принципами, поскольку он позволяет получить конечное уравнение между скоростями тел и переменными величинами, определяющими их положение в пространстве. «При этом вообще принцип сохранения живых сил всегда дает первый интеграл различных дифференциальных уравнений каждой задачи, что во многих случаях представляет большую выгоду»²⁾.

Закон сохранения момента количества движения. Общие замечания

Закон сохранения количества движения, открытый Декартом, относился к поступательному движению. Вращательное движение вплоть до XVIII в. не являлось объектом специального исследования, хотя ньютоновы «Начала» и содержат некоторые теоремы, относящиеся к центробежным силам. Распространение закона сохранения количества движения на вращательное движение было произведено в первой половине XVIII в. Эйлером и Д. Бернулли. Эти ученые пришли к закону сохранения момента количества движения,

¹⁾ Ж. Лагранж, Аналитическая механика, М.—Л., 1950, т. I, стр. 316.

²⁾ Там же.

рассматривая задачу о вращении системы тел вокруг одного неподвижного центра. Эйлер опубликовал свой результат в курсе механики (1736 г.), а Д. Бернулли — в 1746 г. в трудах Берлинской Академии наук. Сущность закона заключалась в том, что при вращении нескольких тел вокруг неподвижного центра сумма произведений массы каждого тела на его скорость вращения вокруг центра и на расстояние его от того же центра будет оставаться всегда постоянной, если эту систему тел можно рассматривать изолированной от всякого внешнего воздействия.

В несколько иной форме закон сохранения момента количества движения был сформулирован французским гидравликом Дарси, изложившим его в одном из докладов Парижской Академии наук (1752 г.). Дарси показал, что сумма произведений массы каждого тела на площадь, описываемую его радиусом-вектором вокруг неподвижного центра, всегда пропорциональна времени (для всех тел эта площадь берется в одной и той же плоскости проекций). В такой форме принцип Дарси по существу явился обобщением одной важной теоремы, доказанной Ньютоном в его «Началах». Теорема эта гласит: «Площади, описываемые радиусами, проводимыми от обращающегося тела к неподвижному центру сил, лежат в одной плоскости и пропорциональны временам описания их»¹⁾. Из этой теоремы Ньютон делает ряд важных следствий относительно свойств центростремительных сил. В свою очередь теорема Ньютона явилась обобщением одного из законов планетных движений, эмпирически доказанного Иоганном Кеплером еще в 1609 г.: радиусы-векторы, проведенные от Солнца к планетам, описывают в равные промежутки времени равные площади. Этот «закон площадей» является по времени первым открытием, имеющим отношение к закону сохранения момента количества движения.

Важность этого закона была впервые понята Лагранжем, который, как мы видели выше, считал его одним из основных принципов механики, на основе которого можно получить «три дифференциальных уравнения первого порядка между временем и координатами».

¹⁾ И. Ньютон, Математические начала натуральной философии, стр. 73.

тами кривых линий, описанных телами; в этих уравнениях, собственно, и заключается природа изложенного выше принципа» ¹⁾).

Подведем итог. К концу XVIII в. идея сохранения движения нашла свое конкретное выражение в нескольких фундаментальных механических принципах и законах. Исторически первым из них явился закон инерции. Открытый Декартом закон сохранения количества движения можно рассматривать как дальнейшее обобщение идеи сохранения механического движения. С открытием закона сохранения момента количества движения действие закона Декарта было по существу перенесено с поступательного движения на вращательное.

Закон сохранения энергии в механике XVIII в. получил свое выражение в двух аспектах: в «теореме живых сил» и в принципе исключенного вечного двигателя. Оба аспекта в различных формах выражали одно и то же, а именно сохранение механической энергии. И хотя связь между этими аспектами была еще скрыта от взора ученых, тем не менее идея сохранения движения в то время нашла в них свое наиболее полное отражение.

Для распространения закона сохранения энергии на другие, немеханические явления необходимо было выйти за пределы механики. Только лишь к концу сороковых годов XIX в. были созданы необходимые предпосылки и выработаны основные физические понятия, на основе которых стало возможным обобщение «теоремы живых сил» до всеобщего универсального закона сохранения и превращения энергии.

Важно также отметить, что в работах Лагранжа по аналитической механике было впервые дано теоретическое обоснование законов сохранения. Его вывод «теоремы живых сил» и других законов сохранения из основных уравнений динамики, ставший классическим, широко в дальнейшем применялся его учениками и последователями. Таким образом, уже в XVIII в. законы сохранения механических величин получили как экспериментальное, так и теоретическое обоснование.

¹⁾ Ж. Лагранж, Аналитическая механика, т. I, стр. 319.

ГЛАВА II

Законы сохранения массы и электрического заряда

В восемнадцатом веке наука еще осязательно проби-
ралась к закону сохранения и превращения энергии. Закон сохранения массы в это время уже считался неоспоримым фактом. Его открытие связано главным образом с исследованиями Ломоносова и Лавуазье и является, пожалуй, наиболее важным достижением науки этого периода. Однако истоки закона сохранения массы, так же как и идея сохранения движения, уходят в седую древность.

Идея сохранения материи в античной натурфилософии

Зачатки представлений о вечности и неуничтожи-
мости материи мы встречаем уже в древних философ-
ских системах Востока. Так, в индийской философии
говорится о том, что вселенная образовалась из неболь-
шого числа (от трех до семи) первичных элементов,
не изменяющих своей природы. От индусов эта идея,
по-видимому, проникла в Грецию, где и получила свое
специфическое отражение в различных философских
учениях античного мира. Один из первых греческих
философов-материалистов Фалес Милетский, живший
в VI в. до н. э., учил, что материя есть то, из чего все
состоит и во что в конце концов превращается. Мате-
рия есть основа всех природных явлений, причем свой-
ства материи могут изменяться, но сама она не исче-
зает и существует вечно. Для Фалеса таким материаль-

ным началом была вода, для Анаксимандра — некая неопределенная материя (апейрон), для Анаксимена — воздух, для Гераклита — огонь. Живший за 450 лет до н. э. греческий философ Эмпедокл утверждал, что ничто не возникает из ничего и ничто не может быть уничтожено. Но наиболее полное развитие идея сохранения материи получила в учении атомистов — Демокрита, Эпикура и других.

Классики марксизма Маркс и Энгельс называют Демокрита «первым энциклопедическим умом среди греков»¹⁾. Он действительно был выдающимся представителем античной науки, писавшим о вопросах не только философии, но и физики, астрономии, биологии, психологии.

Признавая материальность мира, Демокрит вел борьбу против идеализма и религии, пытаясь объяснить сущность явлений природы из нее самой. Он первый среди греческих натурфилософов выдвинул идею о том, что движение неотделимо от материи. Выше уже говорилось, что Демокрит мыслил движение вечным, не имеющим во времени ни начала, ни конца. Так как, согласно Демокриту, атомы качественно одинаковы и различаются лишь формой и положением в пространстве и находятся в вечном движении, то он отсюда, естественно, приходил к заключению о неуничтожимости и несоздаваемости материи и движения. Таким образом, древнегреческий мыслитель-материалист первым высказал положение о вечности материи.

Другой античный философ, Эмпедокл, развивал учение о четырех «стихиях» — материальных первоначалах всего сущего. Такими первоначалами он считал огонь, воздух, воду и землю, которые существуют вечно и сочетания которых образуют различные явления природы. Аристотель также учил, что материя не может возникать из ничего, не может увеличиваться и уменьшаться.

Из этого уже можно сделать вывод, что учение о сохранении материи в философском плане было достаточно глубоко разработано античными мыслителями.

¹⁾ К. Маркс и Ф. Энгельс, Сочинения, Госполитиздат, т. 3, 1955, стр. 126,

Это учение было воспринято средневековыми естествоиспытателями, а затем перешло в общие научные концепции более поздних эпох.

В подавляющем большинстве сочинений естествоиспытателей и философов XVI—XVII вв. можно встретить высказывания о сохранении материи. Так, например, Фрэнсис Бэкон в «Новом органоне» (1620 г.) утверждал, что «ничто из ничего не творится, ничто не уничтожается. Истинное количество материи или полная сумма ее остается постоянной, не увеличиваясь и не уменьшаясь»¹⁾.

Аналогичные мысли мы встречаем и у других ученых (Р. Бойль, Ж. Рей, Э. Мариотт и др.). Согласно Мариотту, «природа не производит чего-либо из ничего и материя не теряется».

Сопоставляя учение античных натурфилософов о сохранении материи с позднейшими высказываниями по этому поводу, нельзя не обратить внимание на то обстоятельство, что античные мыслители, особенно атомисты, связывали это учение с идеей сохранения движения. Хотя в явной форме мы и не находим высказываний на этот счет, тем не менее это следует из самого существа атомистической теории древних. Действительно, поскольку возникновение и уничтожение всего сущего в мире, а также все изменения в природе являются результатом сочетаний бесчисленного множества атомов, движущихся в пустом пространстве, то движение неотделимо от материи. Но так как движение вечно, то вечной, неуничтожимой должна быть и материя. Именно такая мысль проходит через все сочинения Демокрита, посвященные природе.

Эта сторона учения античных философов о материи и движении в новое время не получила должного развития. В частности, в учении Декарта о сохранении движения, а также в трудах его последователей развитие идеи сохранения количества движения происходит в отрыве от идеи сохранения материи. Аналогично в период XVI—XVII вв. развивается и учение о сохранении материи вне связи с идеей сохранения движения. Следует признать, что древние греки оказались прозорливее своих более поздних коллег.

¹⁾ Ф. Бэкон, Новый органон, Соцэкгиз, 1938, стр. 29.

Идея сохранения материи и движения в их взаимосвязи нашла свое конкретное выражение впервые только в XVIII в. в законе сохранения вещества и движения, сформулированном великим русским ученым М. В. Ломоносовым.

Начавшееся в XVIII в. развитие количественных методов в химии способствовало тому, что закон сохранения материи из общеприродного учения перешел в область естествознания и нашел свое экспериментальное обоснование при изучении различных химических процессов, в частности процесса окисления металлов.

Возникновение теории флогистона

Прежде чем наука пришла к правильному пониманию сущности процессов окисления, ей пришлось пройти через ряд заблуждений. Одним из таких заблуждений явилась флогистонная теория горения, основные положения которой были сформулированы в XVII в. И. Бехером, профессором университета в Майнце, и его учеником Г. Сталем, профессором медицины в Галле.

Бехер, исходя из учения Парацельса о началах, составляющих все тела, а именно из ртутного, серного и соляного, выражавших соответственно начала летучести, горючести и твердости, добавил к ним еще две из четырех «стихий» Аристотеля — воду и землю. Последнюю он подразделил на три вида: ртутную, жирную и каменную. Согласно Бехеру, помимо этих земель, существует еще особое начало горючести, названное им *terra pinguis* — горючая земля. Эта горючая земля входит в качестве составной части во все горючие тела.

Процесс горения заключается в том, что горючее тело разлагается на свои составные части, причем горючая земля улетучивается под действием жара. По теории Бехера воздух никакого участия в процессе горения не принимает.

Сталь развил эту теорию далее. Все начала он подразделил на физические и химические. К первым относятся четыре «стихии» Аристотеля, ко вторым — начала Бехера.

Физические начала могут переходить в химические при помощи химических превращений. Начало горючести Сталь назвал флогидзоном (позже — флогистон) от греческого *φλογιστος* — сожженный. Сталь мыслил его как некую невесомую жидкость, содержащуюся во всех телах в больших или меньших количествах. Тела без флогистона гореть не могут, а все горючие тела содержат его в большом количестве. При горении тел флогистон выделяется, сообщая частицам огня вращательное движение. Поэтому такие вещества, как фосфор, сера, древесный уголь и др., при горении выделяют сильный жар. В металлах флогистон содержится в неизменных количествах в соединении с золой. При прокаливании металлов в присутствии воздуха флогистон улетучивается и остается зола. Реакции окисления и восстановления, которые в то время были хорошо известны, рассматривались как отдача и присоединение флогистона.

Теория флогистона пользовалась большим успехом среди химиков XVII в., поскольку на ее основе удавалось рационально и достаточно просто объяснить многие химические явления. Однако уже современники Сталя обратили внимание на то, что некоторые явления находятся в противоречии с теорией флогистона. Так, например, Бойлю было известно, что при горении свинца в закрытом сосуде исчезает не только свинец, но и приблизительно $\frac{1}{5}$ часть всего объема воздуха, взятого для опыта. Было также известно, что при сгорании металла оставшаяся от него зола весит больше, чем сгоревший металл. Увязать подобные расхождения с флогистонной теорией оказалось трудным делом, и поэтому даже некоторые крупные химики того времени не признавали эту теорию.

Теория флогистона и родственные ей метафизические теории невесомых флюидов — теория теплорода и флюидные теории электричества и магнетизма — являлись господствующими концепциями в науке XVIII в. Мало кто из ученых имел смелость в то время выступать против укоренившейся точки зрения на сущность физических и химических явлений. Ломоносов был первым ученым, понявшим полную несостоятельность флюидных теорий и объявившим им беспощадную борьбу. Если не считать моральной поддерж-

ки Эйлера и Бернулли, то в этой борьбе он был одинок. По своему мировоззрению великий русский ученый шел далеко впереди своего века.

Борьба Ломоносова против теории флогистона.

Закон сохранения материи и движения.

Значение закона Ломоносова в науке

Истоки физико-химических теорий Ломоносова восходят к его взглядам на строение материи. Еще в период 1741—1743 гг. в набросках и планах своих будущих работ Ломоносов указывал, что он имеет намерение при помощи «корпускулярной философии» объяснить различные физические и химические явления. Систематическое развитие эти взгляды получили в двух его диссертациях, написанных в 1743 и 1744 гг. Первая из них называлась «Опыт теории о нечувствительных частицах тел и вообще о причинах частных качеств», вторая — «О составляющих природные тела нечувствительных физических частицах, в которых заключается достаточное основание частных качеств». Здесь Ломоносов излагает свои представления о строении материи, которые сводятся к следующему: «Материя — то, из чего состоит тело и от чего зависит его сущность. Материя бывает собственная, составляющая тело, и посторонняя, заполняющая промежутки тела, не заполненные собственной материей»¹⁾).

Все тела, говорит Ломоносов, могут делиться на очень мелкие части, пределом которых являются «мельчайшие нечувствительные частицы, физически разделенные». Эти частицы непроницаемы, обладают силой инерции и протяженностью. Каждая частица состоит из определенного количества вещества. К движению «нечувствительных частиц» приложимы все теоремы механики твердых тел. Благодаря движению этих частиц тела приобретают свои качества: они могут быть теплыми или холодными, обладать тем или иным запахом или цветом. Эти атомистические представления о строении материи развивались Ломоносовым в течение всей его научной деятельности и именно

¹⁾ М. В. Ломоносов, Полное собр. соч., т. I, Изд-во АН СССР, 1951, стр. 151.

на их основе он искал объяснения многообразным физико-химическим явлениям.

Особенно успешно Ломоносов применил атомистическую теорию для объяснения тепловых явлений, в противовес господствовавшей тогда теории теплорода. Он является одним из основоположников молекулярно-кинетической теории теплоты. Но великий ученый не ограничился разработкой «корпускулярной» теории теплоты. В своей замечательной по богатству идей работе «Размышления о причине теплоты и холода», первый вариант которой был написан еще в 1744 г., Ломоносов наряду с изложением своих оригинальных мыслей подвергает уничтожающей научной критике теорию теплорода и показывает ее полную несостоятельность¹⁾. Здесь же попутно он останавливается и на теории флогистона. Он говорит, что поскольку теплота и огонь, согласно защитникам теории теплорода, представляют собой флюиды с одинаковыми свойствами, то доказательство несостоятельности теории теплорода по существу означает также крушение и флогистонной теории. Ломоносов критикует результаты опытов Бойля, в которых последний исследовал вес тел, подвергшихся обжигу. Английский физик нашел, что после обжига некоторые минеральные тела становятся тяжелее. Бойль объяснял этот результат тем, что в процессе обжига флогистон входит в поры тел и тем самым увеличивает их вес. Ломоносов писал по этому поводу: «Допустим, что кроме частей зажженного тела или частиц, летающих вокруг в воздухе, к металлу прибавляется во время обжигания какая-то материя, увеличивающая вес его окалины. Но так как окалины, извлеченные из огня или пламени, теряя теплоту, продолжают сохранять приобретенный вес, то, следовательно, во время обжигания в них внедряется какая-то материя, однако не теплотворная; ибо я не вижу, почему последняя в окалинах, удаленных из огня, забывала бы о своей природе...»²⁾. Далее Ломоносов ссылается на опыты химиков Дюкло и Бургава, которые находятся в противоречии с выводами

¹⁾ Подробно см. в кн.: Я. М. Гельфер, Закон сохранения и превращения энергии в его историческом развитии, Учпедгиз, 1958.

²⁾ М. В. Ломоносов, Полное собр. соч., т. 2, стр. 99.

Бойля. Позже Ломоносов постановкой специальных опытов в своей химической лаборатории полностью доказал ошибочность выводов Бойля.

Теоретические исследования Ломоносова по атомистической структуре материи привели его к формулировке первого в истории науки объединенного закона сохранения материи и движения. Как уже говорилось, Ломоносов полагал, что движение «нечувствительных частичек» — атомов должно подчиняться всем законам механики, в том числе и закону сохранения количества движения. Последний закон с успехом был им применен в диссертации «Размышления о причине теплоты и холода» для объяснения некоторых тепловых явлений, в частности процесса теплопроводности твердых тел. Вот это объяснение: «Если более теплое тело *A* приходит в соприкосновение с другим телом *B*, менее теплым, то находящиеся в точке соприкосновения частички тела *A* быстрее вращаются, чем соседние с ними частички тела *B*. От быстрого вращения частички тела *A* ускоряют вращательное движение частичек тела *B*, т. е. передают им часть своего движения: сколько движения уходит от первых, столько же прибавляется ко вторым. Поэтому, когда частички тела *A* ускоряют вращательное движение частичек тела *B*, то замедляют свое собственное. А отсюда — когда тело *A* при соприкосновении нагревает тело *B*, то само оно охлаждается»¹⁾. Закон сохранения количества движения Ломоносов считал важнейшим законом природы.

Развивая, конкретизируя идеи античных атомистов, Ломоносов неизбежно должен был признать неразрывную связь материи и движения, а следовательно, прийти к идее сохранения материи. Впервые мы встречаем формулировку всеобщего закона сохранения в письме Ломоносова Л. Эйлеру от 5 июля 1748 г., посланном последнему в ответ на приглашение принять участие в научном конкурсе, объявленном Берлинской Академией наук. Письмо это представляло собой целый трактат (25 страниц), в котором Ломоносов излагал свои взгляды на объяснение различных физико-химических явлений. Закон сохранения материи и движения

¹⁾ М. В. Ломоносов, Полное собр. соч., т. 2, стр. 83.

формулируется им в следующем виде: «Все встречающиеся в природе изменения происходят так, что если к чему-либо нечто прибавилось, то это отнимается у чего-то другого. Так, сколько материи прибавляется какому-либо телу, столько же теряется у другого, сколько часов я затрачиваю на сон, столько же отнимаю от бодрствования и т. д. Так как это всеобщий закон природы, то он распространяется и на правила движения: тело, которое своим толчком возбуждает другое к движению, столько же теряет от своего движения, сколько сообщает другому, им двинутому»¹⁾). Этим законом Ломоносов широко пользовался в своих многочисленных исследованиях в области физики и химии, однако впервые он был опубликован спустя двенадцать лет (в 1760 г.) в сочинении «Рассуждение о твердости и жидкости тел». Приведем данную там формулировку: «Все перемены, в натуре случающиеся, такого суть состояния, что сколько чего у одного тела отнимется, столько присовокупится к другому. Так, ежели где убудет несколько материи, то умножится в другом месте, сколько часов кто положит на бдение, столько же сну отнимет. Сей всеобщий естественный закон простирается и в самые правила движения, ибо тело, движущее своей силою другое, столько же оная у себя теряет, сколько сообщает другому, которое от него движение получает»²⁾).

По поводу этого закона Ломоносова много говорилось в отечественной историко-физической литературе. П. С. Кудрявцев писал в своей «Истории физики», что в «нашей литературе существует немало путаницы вокруг «закона Ломоносова»... Одни авторы безоговорочно приписывают Ломоносову авторство в законе сохранения вещества и энергии, другие говорят более осторожно о законе сохранения материи и движения, третьи отказывают Ломоносову в каких-либо правах на авторство в законе сохранения энергии и соглашаются признать его автором закона сохранения вещества на основании опыта с обжиганием металлов в запаянных сосудах»³⁾). К этому следует добавить,

¹⁾ М. В. Ломоносов, Полное собр. соч., т. 2, стр. 185.

²⁾ Там же, т. 3, стр. 383.

³⁾ П. С. Кудрявцев, История физики, т. I, Учпедгиз, 1956, стр. 337.

что некоторые ученые гиперболизировали роль закона Ломоносова в истории науки. В качестве примера можно сослаться на известную статью С. И. Вавилова (1949 г.), в которой говорилось, что закон Ломоносова «есть закон всеобщий, объемлющий всю объективную реальность с пространством, временем, веществом и прочими ее свойствами и проявлениями»¹⁾.

При оценке этого закона следует исходить также и из отношения к нему самого Ломоносова. Последний, по-видимому, не считал свой закон оригинальным открытием, поскольку не отмечал его в своем «конспекте важнейших теорем, которыми обогатил науку Михаил Ломоносов».

Действительно, первая часть закона выражает известный в античной науке принцип сохранения некоторого первоначала, который у Ломоносова конкретизировался в форме закона сохранения вещества. Вторая же часть воспроизводит закон сохранения количества движения Декарта и, следовательно, также ничего нового не содержит. Объединив два закона сохранения в один общий закон, что, несомненно, является заслугой Ломоносова, он тем самым подчеркнул важность законов сохранения при исследовании разнообразных физических и химических явлений.

По нашему мнению, в законе Ломоносова нельзя также видеть и основную идею сохранения энергии, хотя бы уже потому, что сама эта идея была еще чужда науке середины XVIII в. с ее метафизической концепцией неизменных «сил» природы. Тем более чужда была этой эпохе идея превращения «сил». Указанная точка зрения была высказана автором еще в 1958 г.²⁾, и хотя она подвергалась критике³⁾, автор все же считает ее правильной.

Можно вполне согласиться с П. С. Кудрявцевым в оценке закона Ломоносова: «Конечно, Ломоносов не мог дать точной формулировки частных законов сохранения (кроме разве закона сохранения массы), но

¹⁾ С. И. Вавилов, Собр. соч., т. III, стр. 98.

²⁾ Я. М. Гельфер, Закон сохранения и превращения энергии в его историческом развитии, стр. 61.

³⁾ Вопросы философии, т. 8, 1959, стр. 121. Г. П. Мальковский, О массе и энергии в современной физике, Изд-во Казанского университета, 1961.

он правильно указал, что любое научное описание изменений, происходящих в природе, должно опираться на законы сохранения в той или иной форме, и этот принцип Ломоносова блестяще подтверждался и подтверждается всем ходом развития науки, развиваясь и обогащаясь с каждым новым научным открытием»¹⁾.

М. В. Ломоносов был выдающимся ученым и передовым мыслителем своего времени, обогатившим науку открытиями первостепенной важности. Бесспорно, внес он и большой вклад в развитие общей идеи сохранения²⁾. Нет необходимости приписывать ему авторство открытия, которое по условиям его времени не могло быть сделано.

Исследования Лавуазье. Крушение метафизической концепции «невесомых флюидов»

Большое значение в истории установления закона сохранения массы имели работы французского химика А. Лавуазье. Если Ломоносов пришел к своему закону на основе общих теоретико-философских рассуждений, а закон сохранения вещества обосновал опытами с обжигом металлов, то Лавуазье (открывший его спустя 17 лет после Ломоносова) дал всестороннее экспериментальное обоснование закона сохранения массы, в результате которого этот закон превратился в незыблемую основу всего естествознания. Заслуга Лавуазье также и в том, что, правильно поняв природу окислительных процессов, он тем самым доказал полную несостоятельность теории флогистона, и вместе с этим был сделан решающий шаг в деле разрушения всей концепции «невесомых флюидов».

В своих исследованиях Лавуазье опирался на экспериментальные данные в области газов, полученные Блэком, Шееле и Пристли. Этими учеными было показано, что при горении всегда исчезает часть воздуха. Пристли, в частности, установил, что исчезающая часть воздуха представляет собой «обогащенный флогистоном газ», входящий в состав воздуха. Позже Шееле назвал этот газ кислородом. В 1772 г. Ла-

¹⁾ П. С. Кудрявцев, История физики, т. I, стр. 338.

²⁾ Б. И. Спасский, История физики, ч. I, стр. 220—221.

вауэе приступил к проведению серии своих знаменитых опытов, на основе которых он пришел к правильному воззрению на процессы горения и к открытию сложного состава воздуха.

Сначала он проверил результаты опытов Блэка над углекислым газом, а затем перешел к явлениям обжига и восстановления металлов. Проведенные незадолго до этого опыты с серой и фосфором убедили его в том, что увеличение в весе продуктов сгорания этих веществ происходит за счет воздуха, и что флогистон к этому никакого отношения не имеет. При этом он нашел, что при обжиге металлов вес металла увеличивается ровно на столько, на сколько уменьшается вес воздуха. Сопоставляя результаты своих опытов с исследованиями Пристли, Лавуазье пришел к выводу, что «флогистонный газ» есть не что иное, как кислород. 6 апреля 1775 г. он представил в Парижскую Академию наук мемуар с изложением полученных результатов, впервые указав на сложный состав воздуха. К 1783 г. Лавуазье накопил достаточный опытный материал, чтобы начать решительное выступление против теории флогистона.

Установленный Лавуазье опытный факт, что при всех химических процессах, связанных с окислением, вес подвергшихся окислению тел увеличивается за счет кислорода воздуха на столько, на сколько уменьшается вес последнего, и что общий вес остается постоянным, вскоре был обобщен им в виде закона «постоянства веса». Этот закон Лавуазье считал опытным обоснованием общего философского принципа сохранения материи, который был сформулирован им следующим образом: «Ничто не создается ни при искусственных, ни при естественных операциях, и можно принять за правило принцип, что в каждом процессе в начальный и конечный момент находится неизменное количество материи»¹⁾.

Закон сохранения массы Лавуазье положил в основу предложенной им записи химических реакций математическими уравнениями, в которых каждый элемент обозначался соответствующим символом. От

¹⁾ Цит. по кн.: Я. Г. Дорфман, Лавуазье, Изд-во АН СССР, М., 1949, стр. 51.

этой идеи французского химика ведет свое начало нынешняя общепринятая система записи химических реакций.

Бессмертная заслуга Лавуазье состоит в том, что он впервые применил общий философский принцип сохранения материи к решению конкретных вопросов химической науки. С тех пор закон сохранения массы стал основным законом химии.

Значение исследований Лавуазье выходит далеко за рамки химии и имеет большое методологическое значение. Эти исследования вместе с более ранними работами Ломоносова и опытами американского ученого и инженера Б. Томпсона (Румфорда), выполненными в самом конце XVIII в. (1798 г.), в которых была показана несостоятельность теории теплорода, положили конец безраздельному господству теории «невесомых флюидов» и заставили современников задуматься над истинным смыслом тех представлений, которыми они пользовались. Своими историческими работами Ломоносов, Лавуазье и Румфорд пробили крупную брешь во всем метафизическом естествознании XVIII в. В этом отношении они подготовили почву, на которой спустя полвека был открыт великий закон природы — закон сохранения и превращения энергии.

Сделаем несколько общих замечаний о дальнейшем развитии закона сохранения массы. Из краткого изложения истории установления этого закона видно, что после работ Ломоносова и Лавуазье он предстал перед учеными XVIII в. как некоторый эмпирический факт, подтвержденный многочисленными опытами. Никаких драматических коллизий на пути к этому закону не было, и он сравнительно легко «дался» в руки исследователям, не в пример, скажем, закону сохранения и превращения энергии, для установления которого понадобилось не менее полутора столетий. В дальнейшем речь могла идти только о количественной проверке закона сохранения массы в связи с развитием более современных методов определения веса тел. Отметим несколько моментов в этом направлении. В середине прошлого века французский химик Ж. Стасс, усовершенствовав приемы взвешивания, довел точность взвешивания до такого совершенства, что смог обнаружить отличие суммы весов тел до реакции от

суммы весов после реакции лишь на $2,3 \cdot 10^{-6}$ измеряемой величины.

Исследования, специально посвященные проверке закона сохранения массы, провел немецкий ученый Г. Ландольт. С 1890 по 1910 г. он изучал ряд химических реакций и не обнаружил ни одного отклонения от этого закона, несмотря на то, что точность, достигнутая в его опытах, в 100 раз превышала точность измерений Стасса. Результаты своих исследований Ландольт изложил в книге «О сохранении массы при химических взаимодействиях» (1910 г.). Еще бóльшая точность была получена в опытах английских ученых Рамзая и Грея. И в этих опытах никакого отклонения от закона сохранения массы не наблюдалось. Все последующие более точные измерения показывали, что в пределах возможных погрешностей закон сохранения массы не имеет никаких исключений.

Следует сделать несколько замечаний относительно понятий «материя», «вещество», «масса» (с точки зрения современных представлений). Естествоиспытатели XVIII в. под материей понимали «ограниченный специализированный образ, характеризующийся только массой и непроницаемостью»¹⁾. Это весьма удачное определение той сущности, с которой имела дело наука того времени. Над этим еще довольно примитивным образом сумел подняться Ломоносов, абстрагируясь в своем понимании материи от ее конкретных вещественных свойств.

Наиболее общее, глубокое понятие материи было выработано классиками марксизма. Известное ленинское определение материи гласит: «Понятие материи... не означает гносеологически *ничего иного*, кроме как: объективная реальность, существующая независимо от человеческого сознания и отображаемая им»²⁾. Из этого общего понятия материи как объективной реальности необходимо выделить более узкое, соподчиненное ему понятие вещества как формы материи, состоящей из частиц, имеющих массу покоя. На необходимость такого выделения неоднократно указывали физики-материалисты ввиду той путаницы, которая

¹⁾ С. И. Вавилов, Собр. соч., т. III, стр. 98.

²⁾ В. И. Ленин, Собр. соч., т. 14, стр. 248.

возникла в физической литературе в период революционных открытий в начале текущего столетия. Эта путаница зачастую открывала дорогу различным научным спекуляциям. Об этом, в частности, писал С. И. Вавилов в работе «Развитие идеи вещества»: «Широчайшему ленинскому пониманию материи должно быть соподчинено то частное понятие материи, которое до наших дней сплошь и рядом применяется в естествознании и для которого необходим безусловно особый термин. Правильнее всего этот вид материи назвать веществом»¹⁾).

Закон сохранения электрического заряда. Опыты Кулона и Фарадея

В XVIII в. начало складываться понятие об электрическом заряде. В период господства флюидных концепций, когда электричество также рассматривалось как особый флюид, под количеством электричества понимали просто некоторое количество этого флюида, находящегося в заряженном теле. Поскольку, согласно общей концепции флюидов, электрический флюид мыслился как неуничтожимое и несоздаваемое вещество, то его сохранение и неуничтожимость казались сами собой разумеющимися. Существенное отличие закона сохранения массы от «закона сохранения электрического флюида» заключалось в том, что электрические флюиды противоположных знаков взаимно уничтожались.

Следует признать весьма любопытный, в какой-то степени даже парадоксальный исторический факт: убеждение в неразрушимости флюидов было настолько сильным в сознании естествоиспытателей XVIII в. и первой половины XIX в., что сохранение массы и количества электричества казалось само собой разумеющимся фактом. По-видимому, именно этим обстоятельством можно объяснить, что установление законов сохранения массы и количества электричества было связано по существу лишь с их экспериментальной проверкой и прошло гладко без каких-либо существенных дискуссий. Лауэ пишет по этому поводу:

¹⁾ С. И. Вавилов, Собр. соч., т. III, стр. 42.

«Этот фундаментальный результат (закон сохранения количества электричества. — Я. Г.) никогда не вызывал даже приблизительно такого же впечатления, какое было вызвано законом сохранения энергии, доказанным приблизительно в то же время»¹⁾).

С другой стороны, то же самое убеждение в неразрушимости «сил» явилось причиной длительной и упорной борьбы за признание качественной изменчивости этих «сил» и в конечном счете за признание закона сохранения и превращения энергии. Таким образом, одна и та же причина, с одной стороны, способствовала быстрому признанию одних законов сохранения, которые укладывались в рамки старого метафизического естествознания, а с другой стороны, противодействовала признанию естествоиспытателями идеи взаимопревращения «сил», их качественной изменяемости, что находилось в прямом противоречии с убеждением этих естествоиспытателей.

Однако учение о сохранении электрического заряда стало подлинным научным фактом только тогда, когда было выработано понятие количества электричества. Начало этому было положено знаменитыми опытами Кулона по определению силы взаимодействия между наэлектризованными телами. С опытов Кулона и начинается количественное исследование электрических явлений.

К середине XVIII в. техника постановки и проведения электрических экспериментов продвинулась заметно вперед. Это дало возможность изучить более детально некоторые закономерности взаимодействия наэлектризованных тел. Электрические машины, лейденские банки, электроскопы с золотыми листочками и некоторые другие приборы открывали перед исследователями электрических явлений возможность постановки таких экспериментов, о которых в конце XVII в. и в начале XVIII в. нечего было и думать.

Перечисленные выше несложные приборы, к которым следует еще добавить незадолго перед этим изобретенные электрические весы, позволили прийти к важным заключениям относительно характера

¹⁾ УФН, т. 67, в. 4, 1959, стр. 722.

действия электрических сил. Так, в 1759 г. русский ученый Ф. Эпинус и независимо от него известный английский физико-химик Д. Пристли в 1767 г. высказали предположение, что электрические силы должны изменяться обратно пропорционально квадрату расстояния между зарядами. Первое экспериментальное обоснование этой гипотезы было дано в 1773 г. английским физиком Г. Кавендишем, который не опубликовал его в печати. Как Пристли, так и Кавендиш в своих теоретических и опытных исследованиях сил взаимодействия между наэлектризованными телами исходили из ньютоновского учения о силах тяготения. Закон всемирного тяготения, открытый Ньютоном, они считали универсальным законом природы, полагая, что любые силы взаимодействия должны изменяться обратно пропорционально квадрату расстояния. (Известно, что Кавендиш был первым ученым, экспериментально проверившим закон Ньютона.)

В 1785—1786 гг. французский физик Кулон принял серию опытов для нахождения закона взаимодействия «электрических и магнитных флюидов», ничего не зная о работах своих предшественников.

В этих опытах он впервые применил изобретенные им крутильные весы, с помощью которых можно было с достаточно большой точностью измерять силы, действующие между заряженными телами. Принцип крутильных весов в комбинации с чувствительным электрометром позволил ему доказать, что электрические силы действуют обратно пропорционально квадрату расстояния. По аналогии с законом всемирного тяготения Кулон предположил, что эти силы должны быть прямо пропорциональны количеству «электрического флюида», т. е. количеству электричества.

Установленный Кулоном закон, получивший впоследствии его имя, явился первым количественным выражением в учении об электрических и магнитных явлениях. Он послужил началом введения в эту еще мало изученную область математических методов. Уже в 1811 г. Пуассон получил важнейшие результаты. Особенно следует отметить работы великого немецкого математика Гаусса. В 1839 г. в своей классической работе «Общие теоремы, относящиеся к силам

притяжения и отталкивания, действующим обратно пропорционально квадрату расстояния», развив идеи Пуассона, он заложил основы электростатики как раздела математической физики. Гауссу же принадлежит идея использовать закон Кулона для установления единицы количества электричества (1840 г.). Известное определение единицы СГСЭ количества электричества также принадлежит Гауссу. Введенная им мера количества электричества позволила перейти к строгой количественной оценке электрических взаимодействий. Следует отметить, что в первой половине XIX в., так же как и во времена Кулона, еще не было современного понятия об электрическом заряде. Вместо этого употреблялся термин «количество электрической силы».

Строгое экспериментальное обоснование закона сохранения количества электричества было дано Фарадеем в 1843 г. Еще до этого на основании своих опытов по электролизу великий английский ученый пришел к выводу, что «электричество, которое мы, по видимому, можем на время высвобождать из его обиталища и переносить с одного места на другое с сохранением его химической силы, может быть измерено и, как показывают измерения, оказывается при этом столь же определенным по своему действию, как любое из тех количеств, которые, оставаясь связанными с частицами материи, сообщают им их химическое сродство»¹⁾.

Закон сохранения электрического заряда был доказан Фарадеем в связи с исследованиями электростатической индукции, которым он посвятил много сил и времени. Сначала его интересовала качественная сторона явления, но вскоре он перешел и к количественным исследованиям. Результаты серии таких исследований Фарадей изложил в одном из своих писем, адресованном редактору журнала «Philosophical Magazine» 4 февраля 1843 г. (в этом печатном органе Лондонского Королевского общества Фарадей главным образом и публиковал свои научные труды). Один из опытов заключался в следующем: в металлический

¹⁾ М. Фарадей, Экспериментальные исследования по электричеству, Изд-во АН СССР, т. I, 1947, стр. 333.

цилиндрический сосуд («мороженицу»), соединенный с чувствительным электрометром, помещался заряженный латунный шар, подвешенный на шелковой нити. Вследствие индукции на наружной поверхности сосуда наводился такой же по величине заряд, какой имелся на шаре. Мерой величины заряда являлся угол расхождения между листочками электрометра. Этот угол в обоих случаях был одинаков, откуда Фарадей заключил, что «электричество, индуцированное шаром C , и электричество, находящееся в C , точно равны друг другу по количеству и силе»¹⁾.

Стремясь выяснить влияние на индукцию различных диэлектриков и состояния заряда, Фарадей повторил этот опыт в ином варианте. Он взял несколько «морожениц» и вставил их друг в друга, предварительно изолировав одну от другой. И в этом случае, установил Фарадей, «не наблюдается различия в величине индуктивного действия». Также не сказывается и замена трех внутренних «морожениц» одним сосудом из диэлектрика. Только тогда, когда вносятся новые заряды, электрометр фиксирует это увеличение расхождением своих листочков. На основании этих опытов Фарадей заключил: «Таким образом, некоторое количество электричества, действующее в центре сосуда A , проявляет снаружи в точности одинаковую силу вне зависимости от того, как оно действует: путем индукции через пространство между ним и сосудом A или будучи передано A путем проводимости с полным разрушением при этом существующей внутри индукции. Можно также сказать относительно величины индуктивного действия: наполнено ли пространство между C и A воздухом или шеллаком, или серой... или мы придумаем какие-нибудь другие способы для изменения силы: изменением расстояния, или вещества, или действующего заряда в этом пространстве — все равно величина действия остается в точности неизменной. Значит, если тело заряжено, все равно, частица это или масса, в его действии нет ничего, что можно привести в согласие с мыслью о создании или уничтожении, величина силы вполне опре-

¹⁾ М. Фарадей, Экспериментальные исследования по электричеству, Изд-во АН СССР, т. II, 1951, стр. 387.

деленна и неизменна. Единственным способом изменить эту силу может быть только присоединение к ней другой силы того же рода, того же или обратного направления»¹⁾). Заменяя понятие «электрической силы», которым пользуется Фарадей, современным термином «электрический заряд», мы можем читать приведенные выше строки как развернутую формулировку закона сохранения электрического заряда (количества электричества).

Среди блестящих научных достижений Фарадея в области электричества скромные опыты, описанные выше, прошли как-то незамеченными современниками и не получили резонанса в ученом мире, какого заслуживали, хотя по своей значимости они не уступают открытию электромагнитной индукции, законов электролиза и другим открытиям замечательного ученого. Можно полностью согласиться с Лауэ, который так объясняет этот факт: «Этот опыт, не уступающий по своему значению в это же время полученным доказательствам закона сохранения энергии, не нашел такой же оценки только потому, что представление о неразрушаемых электрических флюидах было уже раньше установлено и не нуждалось в защите»²⁾).

Описанные выше опыты Фарадея, неоднократно повторенные с более усовершенствованной аппаратурой другими учеными в последующие годы, убедительно показали, что электрический заряд во всех известных электрических явлениях сохраняется. Но, как видно из приведенной цитаты, Фарадей сам еще не дал четкой формулировки этого закона. Он говорит о сохранении «электрической силы», а не о сохранении количества электричества. Впервые утверждение о том, что электричество нельзя ни создать, ни уничтожить, мы встречаем у Максвелла. Электрические заряды могут только перераспределяться, всегда в равных и противоположных по знаку количествах.

С появлением электродинамики было найдено и математическое обоснование закона сохранения количества электричества, основанное на использовании

¹⁾ М. Фарадей, Экспериментальные исследования по электричеству, т. II, стр. 389—390.

²⁾ М. Лауэ, История физики, Гостехиздат, 1956, стр. 55.

теоремы Остроградского — Гаусса. Развитие электронной теории привело к открытию существования минимального — элементарного — электрического заряда и его материального носителя — электрона.

Общая формулировка закона сохранения электрического заряда была дана в 1881 г. французским физиком Г. Липпманом. Как Липпман, так и современные ему физики уже хорошо понимали роль этого закона в физике и относили его, наряду с законом сохранения энергии и вторым началом термодинамики, к числу важнейших законов природы. Современная формулировка закона гласит: в любой замкнутой системе суммарная алгебраическая величина электрических зарядов остается неизменной при любых процессах, происходящих в этой системе.

ГЛАВА III

Закон сохранения и превращения энергии

Научные и технические предпосылки открытия закона

В гл. I было показано, что к концу XVIII в. в классической механике были установлены два фундаментальных принципа, которые выражали собой частные случаи закона сохранения энергии: «теорема живых сил» и принцип невозможности вечного двигателя. понадобилось еще полвека, чтобы эти принципы превратились в один из важнейших законов природы. За это время наука сделала колоссальный качественный скачок вперед; закон сохранения и превращения энергии не был бы установлен, если бы не были решены следующие вопросы: доказана полная несостоятельность концепции невесомых флюидов, установлена природа теплоты, выработаны понятия энергии и работы, позволившие распространить принцип «живых сил» на немеханические явления, обнаружен и вычислен механический эквивалент теплоты.

Наряду с этим, исследуя шаг за шагом известные факты о взаимном превращении «сил», физики все ближе подходили к идее взаимосвязи различных явлений природы. Рассматриваемый период характерен тем, что эта идея под влиянием крупнейших открытий естествознания стихийно овладевала умами передовых естествоиспытателей. Вспомним основные факты. Конец XVIII в. ознаменовался возникновением гипотезы о происхождении и развитии вселенной в результате саморазвития первичной туманности (Кант и Лаплас). В начале XIX в. появляются первые эволюционные идеи в трудах Ламарка. Тридцатые годы

ХІХ в. внесли идею развития в геологию, а в конце тридцатых годов зоологи Шлейден и Шванн сформулировали основные положения клеточной теории строения организмов.

Последовательное распространение диалектической идеи о развитии и взаимосвязи сил природы на физические явления явилось решающим фактором в установлении закона сохранения и превращения энергии.

Рассмотрим некоторые моменты предистории этого закона. К началу ХІХ в. основное внимание физиков было направлено на изучение важнейших, известных в то время «сил»: механической, электрической и магнитной, а также теплорода. Напомним, что в классической механике Ньютона понятие силы имело определенный смысл: сила рассматривалась как источник движения, совершенно отделенный от движущейся материи. Такое представление о силах как внешних по отношению к материи причинах движения нашло свое дальнейшее развитие в метафизическом учении о «невесомых флюидах», получившем широкое распространение в ХVІІІ в. Таким образом, ньютоновское понятие силы получило своеобразное обобщение: с одной стороны, было введено представление о различных «силах», соответствующих тем или иным явлениям природы (электрические, магнитные и др.), а с другой — эти силы рассматривались как некие нематериальные начала, приводящие в движение инертную материю. Учение о флюидах по существу являлось разновидностью этой концепции. Однако, естественно, пытливый ум человека не мог ограничиться лишь признанием одного факта существования этих таинственных «сил» и «флюидов», сколь правдоподобно они ни объясняли существо явлений. По мере развития науки возникал вопрос, сначала еще робко, а затем все более настойчиво, о природе каждой «силы». Вся первая половина ХІХ в. была посвящена поискам ответа на этот вопрос. Труд ученых многих стран увенчался выдающимся успехом: была показана полная несостоятельность предшествующего учения о «силах» и «флюидах». То, о чем говорили наиболее выдающиеся ученые еще в ХVІІІ в. (Ломоносов, Бойль и др.), теперь полностью подтвердилось.

Крушению метафизической концепции способствовало открытие взаимосвязи между различными видами «сил» и прежде всего между механической «силой» и теплотой. Если превращение теплоты в работу было известно уже давно и еще в XVII в. конструктивно оформлено в виде примитивной паровой машины, то попытки обоснования этого факта с научной точки зрения появляются лишь в конце XVIII в. Интересно отметить, что эти попытки не принадлежали изобретателям паровой машины, которые, по существу, и не задумывались над природой физических процессов, протекавших в этих машинах. Никому из них на протяжении всего XVIII в. не приходила в голову мысль рассмотреть работу паровой машины с точки зрения взаимопревращения механической «силы» и теплорода. По-видимому, в этом кроется одна из причин того факта, что важнейшее техническое изобретение, которое произвело революцию в промышленности и транспорте, тем не менее не поколебало устоев теории теплорода, безраздельно господствовавшей в это время в физике.

Количественная взаимосвязь между теплотой и механической «силой» (работой по современной терминологии) впервые выявилась в известных опытах Румфорда, проведенных в 1798 г. Но американский ученый не сделал решающего шага и не вычислил их отношения, хотя в его работах говорится о теплоте как роде движения и используется «теорема живых сил».

В 1824 г. французский инженер Сади Карно впервые рассмотрел теоретически процесс превращения теплоты в работу в паровых машинах с точки зрения господствовавшей в то время теории теплорода. Это классическое исследование сыграло очень большую роль в дальнейшем развитии представлений о природе теплоты, поскольку в нем Карно сформулировал принцип, составивший впоследствии ядро важнейшего закона природы — второго начала термодинамики. Считая теплоту неуничтожимым флюидом, Карно, естественно, не ставил вопроса о количественной взаимосвязи теплоты и работы. Тем не менее он интуитивно чувствовал, что некоторые положения теории теплорода нельзя считать верными, и высказывал

неудовлетворенность существующей теорией теплоты. Много лет спустя после смерти Карно были опубликованы материалы из его личного архива, откуда стало ясно, что он пришел в конце своей жизни (1832 г.) к правильному воззрению на теплоту как форму движения и сделал попытку вычислить механический эквивалент теплоты.

В конце тридцатых годов XIX в. идея об эквивалентности теплоты и работы высказывается некоторыми учеными и инженерами как определенное утверждение. Так, французский инженер Сеген сформулировал эту идею следующим образом: «Так как современная теория (теплоты. — Я. Г.) привела бы... к вечному движению, то мне показалось более естественным предположить, что определенное количество калорий исчезает в самом акте производства механической силы, и обратно: что оба явления связаны между собой условиями, которые делают неизменными их взаимные отношения»¹⁾.

Аналогичные мысли высказывает в 1841 г. английский адвокат Гров, занимавшийся на досуге физическими исследованиями. В своем сочинении «О соотношении физических сил» он пишет: «Теплота является производителем всех других видов сил. Поэтому, если рассматривать действие теплоты, как механической силы, должно ожидать а priori, независимо от всякой теории, что данное количество теплоты, действуя на данное вещество, должно произвести определенное количество двигательной силы. Затем рождается вопрос: производит ли одно и то же количество теплоты одно и то же количество механической силы, каково бы ни было вещество, подверженное действию теплоты?»²⁾.

Эти и им подобные идеи возникли не случайно. Они обобщали важные факты, открытые предшественниками вышеназванных ученых и инженеров. Среди этих фактов первое место принадлежит открытию тепловых эффектов в газах при их сжатии и расширении, сделанному в первом десятилетии XIX в. Гей-Люсса-

¹⁾ Цит. по кн.: Э. Мейерсон, Тожественность и действительность, СПб., 1912, стр. 203.

²⁾ В. Гров, О соотношении физических сил, Харьков, 1864, стр. 63.

ком, Дальтоном и Пуассоном. Особенно большое значение имело открытие Гей-Люссака, который показал, что при расширении газов потребляется больше теплоты, чем при неизменном их объеме, если нагревать газ на одно и то же число градусов. Этот результат был позже использован Робертом Майером, вычислившим таким образом впервые механический эквивалент теплоты.

Интересные мысли о взаимосвязи между теплотой и работой были высказаны в 1834 г. известным русским физиком и инженером Б. С. Якоби в работе «Об использовании естественных сил природы для нужд человека», в которой не только прямо говорится об эквивалентности теплоты и работы, но и делается попытка вычислить этот эквивалент.

Не менее важные открытия, способствующие утверждению и широкому распространению идеи о взаимосвязи «сил» природы, были сделаны в области учения об электрических и магнитных явлениях. В течение всего XVIII в. и первых двух десятилетий XIX в. электричество и магнетизм считались совершенно не связанными друг с другом явлениями. Электрические действия объяснялись существованием специфического «электрического флюида», а магнитные — «магнитным флюидом». Необходимость ревизии подобных взглядов стала очевидной сразу же после замечательного открытия Эрстеда в 1820 г., показавшего, что магнетизм порождается током. Вряд ли в истории физики можно указать открытие, которое произвело на современников такое впечатление, как открытие датского ученого. Опыты ряда физиков других стран (Био, Савар, Араго, Вебер, Ампер и др.), ставившие своей целью как проверку, так и дальнейшее развитие наблюдения Эрстеда, в ближайшее десятилетие разрушили укоренившиеся представления об электричестве и магнетизме как о неких таинственных флюидах. Уже сам факт превращения «электрического флюида» в «магнитный флюид» оказался полностью несовместимым с флюидной концепцией, рассматривавшей флюиды как совершенно неизменные сущности и которой вообще была чужда сама идея превращения одного флюида в другой.

Несостоятельность концепции флюидов в области электричества и магнетизма стала совершенно очевидной после того, как Фарадей в 1831 г. открыл явление электромагнитной индукции и тем самым показал возможность обратного превращения магнитного «флюида» в электрический. Таким образом, факт взаимного превращения «сил» — электрической в магнитную и, обратно, магнитной в электрическую — был полностью экспериментально обоснован.

Выдающееся открытие Фарадея не было случайным. Через все его исследования красной нитью проходит одна руководящая идея — о взаимной превращаемости «сил» природы. Именно убеждение в том, что эта взаимосвязь существует, дало направление всем его поискам и привело к блестящим открытиям: «Долголетнее и неизменное убеждение в том, что все силы природы находятся во взаимной связи, имея общее происхождение или, скорее, представляя собой различные проявления единой основной силы, побуждало меня часто думать о возможности установления путем опыта связи между тяготением и электричеством и о включении, таким образом, первого из них в группу, цепь которой, включающая в себя также магнетизм, химические силы и теплоту, соединяет общей связью столь много и столь различных проявлений силы» ¹⁾.

Подтверждение своей идее о единстве сил Фарадей видит не только в явлении электромагнитной индукции, но и в результатах других своих открытий и исследований. Так, изучая электрохимические процессы, он вплотную подошел к вопросу о связи химических сил и электричества, а следовательно, к давнишнему спору о контактной и химической теории вольтова столба. Сторонники контактной теории утверждали, что появление тока в вольтовом столбе есть результат контакта разнородных веществ и представляет собой первичное явление. Сторонники химической теории (к их числу принадлежал и Фарадей) защищали ту точку зрения, что ток в вольтовом столбе возникает благодаря химическим реакциям при контакте

¹⁾ М. Фарадей, Экспериментальные исследования по электричеству, т. II, стр. 224.

и, таким образом, является вторичным явлением. Фарадей много сил посвятил исследованию работы гальванического элемента и внимательно проанализировал все доводы сторонников контактной теории. В результате он пришел к выводу, что «контактная теория допускает, что сила, способная преодолеть мощное сопротивление..., может будто бы возникнуть из ничего, что без всякого изменения действующей материи или без расхода какой-либо производящей силы может производиться ток... Это было бы поистине сотворением силы, и это не похоже ни на какую другую силу в природе. Мы имеем много процессов, при которых форма силы может претерпеть такие изменения, что происходит явное превращение ее в другую силу. Так, мы можем превратить химическую силу в электрический ток или ток в химическую силу. Прекрасные опыты Зеебека и Пельтье показывают взаимную превращаемость теплоты и электричества; а опыты Эрстеда и мои собственные показывают взаимную превращаемость электричества и магнетизма. Но ни в одном случае, даже с электрическим углем и скатом, нет чистого сотворения силы без соответствующего израсходования чего-либо, что питает ее»¹⁾. Приведенная выдержка взята из работы Фарадея «Об источнике мощности гальванического элемента», выполненной в 1839 г., т. е. за много лет до открытия и фактического признания закона сохранения и превращения энергии.

Фарадей был прямым предшественником ученых, которые сформулировали закон сохранения и превращения энергии как всеобщий закон природы. Следует также отметить, что Фарадей был одним из немногих в то время физиков, которые вкладывали в старое ньютоновское понятие силы энергетическое содержание, т. е. рассматривали понятие силы в духе Лейбница. Правда, Фарадей не всегда был последователен в этом отношении, используя иногда термин «сила» в его прямом ньютоновском смысле.

Очень важным открытием, в еще большей степени подчеркнувшим взаимопревращаемость «сил» в элек-

¹⁾ М. Фарадей, Экспериментальные исследования по электричеству, т. II, стр. 150.

ромагнитных явлениях, явилось открытие русским академиком Э. Х. Ленцем закона о направлении индуцированных токов в 1833 г., вскоре после открытия электромагнитной индукции. Современники Ленца были еще далеки от мысли, что этот закон является энергетическим принципом. Что это действительно так, показал в 1847 г. Г. Гельмгольц в своей классической работе «О сохранении силы». Перемещение магнита в присутствии замкнутого проводящего контура требует большей затраты механической энергии, чем в его отсутствие, так как в первом случае часть механической энергии переходит в электромагнитную энергию индуцированного в контуре тока, препятствующего движению магнита.

Взаимопревращаемость электромагнитных «сил» и механического движения особенно наглядно проявилась в различных электрических двигателях и генераторах электричества, которые были изобретены вскоре после открытий Эрстеда и Фарадея. «Прекрасные опыты Зеебека и Пельтье», о которых писал Фарадей, имеют также непосредственное отношение к доказательству взаимопревращения сил. В 1821 г. Т. Зеебек обнаружил наличие электрического тока в цепи, составленной из двух разнородных металлов, при нагревании одного из спаев. Этот ученый впервые исследовал и некоторые закономерности открытого явления (зависимость эффекта от рода металлов, от температуры и т. д.). Обратимость этого явления была доказана в 1834 г. Ж. Пельтье, показавшим, что если через спай двух разнородных металлов пропустить электрический ток, то в этом спае происходит либо выделение, либо поглощение теплоты в зависимости от направления тока. Явление Пельтье было весьма наглядно подтверждено опытами Э. Х. Ленца, которому таким способом удалось заморозить каплю воды, помещенную в область спая сурьмяно-висмутовой термопары.

К тому же времени относится начало изучения количественной стороны теплового действия тока, проведенное независимо друг от друга Ленцем и Д. Джоулем. В 1833 г. Ленц высказал мысль, что нагрев металла должен изменять его проводимость и что этот фактор следует учитывать при расчете проводящих

цепей. Для этого необходимо было установить зависимость количества выделяющегося в цепи тепла от силы проходящего тока. Проведя ряд тщательно поставленных опытов, Ленц нашел эту зависимость в 1844 г. Он, а затем и Джоуль показали, что количество теплоты должно быть пропорционально квадрату силы тока.

Таким образом, мы видим, что в исследованиях Ленца взаимопревращаемость различных «сил» — механической, электрической, магнитной, а также теплоты — выступала весьма отчетливо. Количественное изучение этих взаимопревращений привело Ленца к установлению важных частных случаев закона сохранения и превращения энергии. Поэтому замечательный русский физик является одним из ближайших предшественников ученых, сформулировавших этот закон в общей форме. В трудах этих ученых, посвященных закону сохранения и превращения энергии, в частности в трудах Гельмгольца, мы встречаем ссылки на исследования Ленца, что говорит о непосредственном влиянии идей русского физика на формирование их взглядов относительно единства сил природы.

Ломоносов, Якоби, Ленц были далеко не единственными русскими физиками, труды которых подготовили почву для открытия закона сохранения и превращения энергии. В рассматриваемый период петербургский академик Гесс провел широкий и систематический анализ химических процессов, сопровождающихся выделением и поглощением теплоты. Подобные исследования проводились и до него (Эндрюс, Фавр и др.), но они были неточными, и поэтому никаких количественных выводов о связи между химическими «силами» и теплотой сделать было нельзя. Гесс ставил свои опыты с исключительной по тому времени точностью, и их анализ позволил ему в 1840 г. прийти к очень важному заключению о том, что тепловой эффект химической реакции зависит не от ее промежуточных стадий, а только от начального и конечного состояний реагирующей системы. В законе Гесса впервые проявилось фундаментальное свойство внутренней энергии системы как функции состояния — ее независимость от пути перехода системы из начального в конечное состояние. Работы Гесса не только

показали возможность непосредственного превращения химической «силы» в теплоту, но и позволили количественно оценить это превращение. Закон Гесса, играющий в термохимии большую роль, явился одним из наиболее важных энергетических принципов, открытых в период становления закона сохранения энергии.

Мы остановились на наиболее важных исследованиях, в которых превращение «сил» выступало особенно наглядно. Но необходим был еще огромный шаг вперед, чтобы привести все эти разрозненные факты в единую систему и установить общий вывод, а именно что «силы суть неразрушимые и качественно способные к превращению объекты», как сформулировал впервые это положение Р. Майер.

Вместе с тем накопленный к этому времени огромный фактический материал неизбежно должен был привести ученых к мысли о необходимости пересмотреть вообще все старые укоренившиеся представления о «силах» как неизменных категориях и выработать такое физическое понятие, которое отвечало бы новым представлениям. Стало очевидным, что существующее понятие силы является двусмысленным.

Развитие понятий энергии и работы

Мы видели, что в старой терминологии под «силой» не только понимали причину движения и деформации тел, но и вкладывали в нее энергетический смысл. Становилось все более ясно, что нужно понятие, отражающее важнейшую специфику «сил» — факт их взаимного превращения и их «неразрушимость». Поэтому далеко не последнюю роль в подготовке открытия закона сохранения и превращения энергии сыграли идеи, на основе которых были выработаны соответствующие этому закону понятия, в первую очередь понятие энергии.

Поэтому мы рассмотрим прежде всего формирование понятия энергии, завершившее длительную эволюцию лейбницевской «живой силы». Уже в период спора о мере движения многим ученым стало ясно, что термин «живая сила» является более гибким, чем декартова мера «количество движения». Понятием «жи-

вой силы» широко пользовались ученые XVIII в. в своих механических исследованиях. Некоторые из них довольно близко подходили к понятиям, эквивалентным современному потенциалу (например, Эйлер).

В начале XIX в. в механике наряду с «живой силой» появляется термин «энергия» как эквивалент «живой силы». Впервые этот термин был введен английским естествоиспытателем Томасом Юнгом, заимствовавшим его, по-видимому, у Аристотеля, обозначавшего этим греческим словом (*ἐνεργεια*) некоторое деятельное начало.

Анализируя различные механические явления, такие, как удар упругих и неупругих тел, а также действие разнообразных механических приспособлений, простых машин и т. п., Юнг уже в 1807 г. в своих «Лекциях по естественной философии» писал: «Почти во всех случаях, встречающихся в практической механике, работа, необходимая для воспроизведения движения, пропорциональна не моменту, а энергии воспроизведенного движения... Словом «энергия» следует обозначать произведение массы или веса тела на квадрат числа, выражающего скорость»¹⁾.

Возвращаясь к этому вопросу в другом месте своего курса, Юнг также отмечает, что «произведение массы тела на квадрат скорости естественно называть энергией»²⁾, а в примечании к этому определению указывает, что «это произведение называлось живой силой... С тех пор некоторые полагали ее действительной мерой движения; и хотя это мнение общепризнано, до сих пор еще сила оценивается по прежнему наименованию».

У Юнга понятие энергии еще не выходит за рамки механики и относится только к кинетической энергии (выражение $mv^2/2$ было введено в 1829 г. Кориолисом). Естественно поэтому, что юнговский термин был еще далек от того универсального значения, которое приобрело понятие энергии в процессе дальнейшего развития физики, в частности после открытия закона сохранения и превращения энергии. Общее определение

¹⁾ T. Young, Lectures on Natural philosophy, London, v. I, 1807, pp. 78—79.

²⁾ То же, v. II, p. 52.

энергии как меры взаимопревращения качественно различных форм движения материи и ее основное свойство оставаться неизменной величиной в замкнутых системах были найдены значительно позже. Весьма важный вклад в развитие понятия энергии был внесен В. Томсоном и В. Ренкином в период становления термодинамики.

Интересно отметить, что основоположники закона сохранения и превращения энергии Майер, Джоуль и Гельмгольц и их современники продолжали называть этот закон «законом сохранения силы». Только в 1860 г. В. Томсон в своей классической работе «Динамическая теория теплоты» употребил термин «энергия» в его современном значении: «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» ¹⁾. Несколько раньше шотландский физик и инженер Ренкин стал использовать понятие энергии в технических расчетах в области теории тепловых машин. Он же впервые назвал закон сохранения силы законом сохранения энергии. После работ Ренкина и особенно В. Томсона, который был ревностным пропагандистом закона сохранения энергии, понятие энергии быстро получило права гражданства и прочно вошло в науку, вытеснив в конце концов термин «сила» в его энергетическом смысле. За последним осталось его нынешнее содержание.

В приведенной выше цитате из «Курса лекций по естественной философии» Юнга обращает на себя внимание термин «работа», который здесь встречается впервые, а также утверждение о пропорциональности работы и энергии. Юнг, однако, не разъясняет, что он понимает конкретно под «работой». Понятия, аналогичные по смыслу работе, встречались неоднократно в физике еще со времен Галилея, «момент» которого, как мы помним, был именно таким понятием. Кулон и некоторые его предшественники и современники говорили о «количестве действия», Л. Карно — о «мо-

¹⁾ Сб. «Второе начало термодинамики», ГТТИ, 1934, стр. 161.

менте деятельности», а С. Карно, Монж и Ашетт — о «динамическом эффекте».

Д. Бернулли в своей «Гидродинамике», пожалуй, первый довольно близко подошел к правильному пониманию работы, назвав ее «абсолютная мощность» или «абсолютная потенция». В девятой части «Гидродинамики» мы читаем: «Произведение...движущей силы на ее скорость, а также на время, в течение которого она развивает свое давление, я буду называть абсолютной мощностью или, так как произведение скорости на время прямо пропорционально просто пройденному пути, то абсолютную мощность можно определить также с помощью движущей силы, умноженной на пробегаемое ею расстояние. Это произведение я называю абсолютной мощностью в силу того, что только с ее помощью следует оценивать труды работников, понесенные ими на поднятие вод»¹⁾).

В начале XIX в. аналогом понятия работы выступало также «количество движущей силы», которым часто пользовались ученые, занимавшиеся теорией тепловых машин, как, например, Сади Карно и Клапейрон.

Систематическое употребление термина «работа» в его механическом понимании ведет свое начало от труда французского инженера и механика Ж. Понселе «Курс механики в приложении к машинам»²⁾. Если вначале Понселе еще пользовался кулоновским «количеством действия», то вскоре ему стало ясно, что необходимо для обозначения эффективности полезного действия машин пользоваться каким-либо одним определенным термином. По совету Кориолиса он останавливается на термине «механическая работа» или просто «работа». О происхождении этого термина Понселе ничего не говорит. Энгельс указывает по этому поводу, что «слово „работа“ и соответствующие представления идут от английских инженеров»³⁾. Понселе весьма подробно обосновывает целесообразность введения в обиход инженеров этого понятия и дает

¹⁾ Д. Бернулли, Гидродинамика, стр. 232.

²⁾ J. Poncelet, Traite de mécanique appliquée deux machines, Paris, 1826.

³⁾ Ф. Энгельс, Диалектика природы, Госполитиздат, 1964, стр. 81.

способ измерения работы. Его рассуждения сводятся к следующему: «Сила или производительная мощность машины и двигателей, их возможности и их эффект, а также механическое количество оцениваются в промышленности по количеству работы определенного рода, которое они способны производить в данное время...»¹⁾. Поскольку, пишет далее Понселе, «работы, выполненные двигателями и машинами, бесконечно различны», то «чтобы иметь возможность их сравнивать между собой, механики должны ввести какую-то единицу особого рода». Эта единица, согласно Понселе, связана с вертикальным подъемом весомого тела, и в качестве ее естественной меры следует взять произведение pH , где p — вес тела, а H — высота его подъема. «Такое представление и такая мера, — говорит Понселе, — для механической работы совпадает с тем, как на практике оплачивается всякая работа, связанная с поднятием тяжестей, например, выкачивание воды из шахт, поднятие земли или каких-либо материалов на некоторую высоту».

Понселе обращает внимание на то обстоятельство, что введение термина «работа» поможет избежать двойственного толкования слова «сила», поскольку под силой «мы будем отныне понимать только давление, простое усилие, развиваемое некоторым действующим агентом в любой точке и в определенном направлении».

В работах Понселе впервые указывается на связь между «живой силой» и работой: «Вода, содержащаяся в резервуаре мельницы, представляет известную работу, которой можно располагать и которая превращается в живую силу, когда мы открываем задерживающий затвор; живая сила, приобретенная водой, благодаря ее падению из резервуара в свою очередь переходит в известное количество работы, когда оно действует на мельничное колесо, а это колесо передает эту работу на жернова и другие предметы, производящие все операции»²⁾.

¹⁾ J. Poncelet, Traite de mécanique appliquée deux machines, p. 5.

²⁾ Цит. по кн.: Э. Мейерсон, Тожественность и действительность, стр. 202.

У Понселе, как мы видим, понятие работы остается еще всецело в рамках механики. Между тем у Сади Карно (1824 г.) в его «Размышлении о движущей силе огня» мы встречаем указание на то, что «движущую силу» теплоты следует исчислять произведением давления пара на изменение его объема.

Энгельс указывает, что чисто механическое понятие работы далеко не исчерпывает всего содержания этого понятия: «Если теплота превращается — как это имеет место в паровой или калорической машине — в механическое движение, т. е. если молекулярное движение превращается в движение масс, если теплота разлагает какое-нибудь химическое соединение, если она превращается в термоэлектрическом столбе в электричество, если ток выделяет из разбавленной серной кислоты составные элементы воды или если, наоборот, высвобождающееся при химическом процессе какого-нибудь гальванического элемента движение (иначе говоря, энергия) принимает форму электричества, а это последнее в свою очередь превращается в замкнутой цепи в теплоту, — то при всех этих явлениях форма движения, начинающая процесс и превращающаяся благодаря ему в другую форму, совершает работу, и притом такое количество ее, которое соответствует ее собственному количеству. Таким образом, работа — это изменение формы движения, рассматриваемое с его количественной стороны»¹⁾.

Важную роль в выяснении физического смысла величин энергии и работы сыграли исследования английских математиков Грина и Гамильтона. Первый из них ввел в науку фундаментальное понятие «силовой функции», установив для нее важнейшие соотношения, известные как формулы Грина. Хотя понятие о силовой функции было известно еще Эйлеру и Лапласу и некоторым другим ученым, тем не менее только Грин показал всю плодотворность этого понятия в решении конкретных физических задач. Сочинение Грина по этому вопросу «Опыт приложения математического анализа к теории электричества и магнетизма» (1828 г.) считается классическим.

¹⁾ Ф. Энгельс, Дialectика природы, 1964, стр. 77.

В своих исследованиях по динамике Гамильтон применял открытый им «принцип Гамильтона», в котором использовалась введенная им функция, представлявшая собой полную энергию консервативной системы, слагающуюся из «суммы сил напряжения и суммы живых сил», т. е., по современной терминологии, представлявшая сумму потенциальной и кинетической энергии системы. Формулами Грина и функцией Гамильтона, так же как и его вариационным принципом, широко пользуются в современной теоретической физике.

Дальнейшее развитие методы Грина и Гамильтона получили в трудах целого ряда математиков и физиков, среди которых в первую очередь следует отметить Гаусса, сочинение которого «Общие теоремы, относящиеся к силам притяжения и отталкивания, действующим обратно пропорционально квадрату расстояния», упомянутое выше, во многом способствовало выяснению физического смысла новых понятий и их отношений к понятиям энергии и работы.

Физический смысл этих понятий в рассматриваемый период не был еще достаточно ясен, хотя математическая сторона большинства физических проблем, связанных с применением понятий энергии и работы, была в достаточно полной мере разработана. Этот смысл и универсальное значение понятий энергии и работы выяснились только после открытия закона сохранения и превращения энергии.

Открытие закона сохранения и превращения энергии. Исследования Майера и Джоуля

Открытие закона сохранения и превращения энергии явилось завершением синтеза двух линий развития классической физики XVIII в. и первой половины XIX в. Одна из них ведет свое начало от спора о двух мерах движения и проходит через эволюцию лейбницевой живой силы к понятию энергии. Другая линия развития через идею о количественном постоянстве «сил» природы привела к общему выводу о постоянстве суммы всех видов энергии в исследованной системе. Эта последняя линия тесно связана с последовательным развитием молекулярно-кинетических

представлений о теплоте, которое происходило в упорной многолетней борьбе против теории теплорода. Эта линия развития завершилась открытием механического эквивалента теплоты и созданием на его основе механической теории теплоты. В формировании этой важнейшей теории классической физики основополагающую роль сыграли труды Майера, Джоуля и Клаузиуса¹⁾.

К середине XIX в. физикам, обладавшим широким кругозором и критическим мышлением, было достаточно ясно, что все имеющиеся в их распоряжении факты говорят о том, что «силы» качественно изменяемы и количественно неуничтожимы. Наиболее яркое и обоснованное выражение эта точка зрения получила в знаменитом докладе Гельмгольца «О сохранении силы».

Остановимся кратко на основных идеях общепризнанных основоположников великого закона природы, и прежде всего Роберта Майера. Врач по образованию, Майер исходил из физиологических наблюдений. В одном из писем к своему другу математику Бауру он писал в 1841 г.: «Когда мне представилось, что я здесь постиг истинные принципы, я, последовательно возвращаясь согласно этим принципам в обратном направлении, неизбежно пришел в область физики и химии. При этом возникло естественнонаучное мировоззрение, которое полностью осветило мне необозримый и поистине бесконечный ряд до сих пор необъяснимых явлений и которое, помимо проблем естествознания и специальной медицины, разрешает мне важнейшие вопросы метафизики»²⁾.

Отправным пунктом размышлений Майера явилась поездка в качестве судового врача на остров Яву в начале сороковых годов прошлого века. Однажды во время стоянки судна на рейде в Батавии среди матросов и местного населения распространилось острое легочное заболевание. Одним из методов лечения этого заболевания в то время было кровопускание. Пуская кровь у местных жителей, долго проживших в условиях жаркого тропического климата, и у матросов,

¹⁾ Подробно см. Я. Гельфер, Закон сохранения и превращения энергии в его историческом развитии, Учпедгиз, 1958.

²⁾ Р. Майер, Закон сохранения и превращения энергии, ГТТИ, 1933, стр. 290.

проживших в этих условиях короткое время, Майер обратил внимание на различие в цвете крови. В то время как у матросов она имела нормальный цвет, у местных жителей кровь отличалась необыкновенно яркой окраской. Это явление приковало внимание пытливого врача, и он попытался найти ему объяснение. При этом он исходил из известной теории Лавуазье, согласно которой теплота, развиваемая в живом организме, является результатом горения.

Прийти к правильному объяснению наблюдаемого факта Майеру помогло твердое убеждение в том, что как в органическом мире, так и в неживой природе действуют одни и те же физические и химические законы. Причину изменения цвета крови Майер правильно увязывал с теми явлениями окисления, которые происходили в живом организме.

В конечном счете размышления Майера привели его к двум важным заключениям: 1) разница в цвете крови должна находиться в каком-то отношении к разнице температур тела человека и окружающей среды, 2) разница в цвете крови является выражением потребления организмом кислорода, т. е. она должна выражать интенсивность окислительных процессов (процесса «сгорания») в организме. Связав оба заключения вместе, Майер логически пришел к выводу, что между теплотой, образующейся в организме в результате его жизнедеятельности («сгорания» пищи), и произведенной им работой существует определенная количественная связь.

В июне 1841 г. идеи Майера вылились в окончательную форму, и он направил в один из наиболее авторитетных в то время физических журналов «*Annalen der Physik*» статью «О количественном и качественном определении сил». Издатель журнала Поггендорф не только не опубликовал статью, но даже не ответил автору. Статья была найдена после смерти Поггендорфа в его архиве. На решение Поггендорфа не публиковать статью Майера, по-видимому, оказало влияние несколько моментов. Важнейший из них тот, что Майер, не будучи физиком, изложил свои идеи недостаточно четко и последовательно. Поггендорф просто не понял оригинальных идей неизвестного врача, которые не укладывались в логические рамки физики первой

половины XIX в. с ее ослабленной, но все еще живучей метафизической концепцией неразрушимых флюидов. Не поняли идей Майера и его ближайшие друзья Баур и Гринингер, в письмах к которым он изложил цепь логических умозаключений, приведших его к выводу о существовании эквивалентности между теплотой и механической работой.

В своих письмах Майер подчеркивал необходимость выхода за пределы физиологии в область физики, так как только тогда можно сформулировать всеобщий закон природы, частным случаем которого являются наблюдаемые им физиологические эффекты. Напротив, Баур и Гринингер советовали ему тщательно разработать свои физиологические наблюдения.

Приведем некоторые высказывания Майера из работы «О количественном и качественном определении сил», которые показывают, что уже в 1841 г. он владел основной идеей закона сохранения и превращения энергии. Так, он пишет: «Таким образом, принцип, согласно которому раз данные силы количественно неизменны, подобно веществам, логически обеспечивает нам продолжение существования разностей, а значит, материального мира. Мы примем поэтому, что как наука, занимающаяся изучением вида бытия веществ (химия), так и наука, изучающая вид бытия сил (физика), должна считать количество своих объектов неизменным и только качество их изменяющимся»¹⁾. Никто из предшественников Майера не поднимался до такого широкого обобщения идеи сохранения «сил».

Майер также высказывает здесь мысль о том, что все формы движения материи могут быть измерены одной мерой: «Движение, теплота и, как мы намерены показать в дальнейшем, электричество представляют собой явления, которые могут быть сведены к единой силе, которые измеряются друг другом и переходят друг в друга по определенным законам»²⁾. Приведенные строки говорят о том, что лейбницевское понимание «силы» как энергии было той основой, тем фундаментом, на котором Майер воздвигал свое учение о количественном и качественном сохранении «сил».

¹⁾ Р. Майер, Закон сохранения и превращения энергии, стр. 62.

²⁾ Там же, стр. 68—69.

Дальнейшее развитие идей Майера мы находим как в его переписке с Бауром и Гризингером, так и в нескольких работах, опубликованных в малоизвестном среди физиков издании «Annalen der Chemie und Pharmazie». Первая из этих работ появилась в печати в мае 1842 г. и называлась «Замечания о силах неживой природы». Основная задача исследования сформулирована автором следующим образом: «Целью следующих строк является попытка ответить на вопрос о том, что мы должны понимать под «силами» и как таковые относятся между собой»¹⁾. Отправным пунктом своих рассуждений Майер берет общее философское положение «причина равна действию» (*causa aequat effectum*): «Силы суть причины, следовательно, к ним имеет полное применение аксиома: *causa aequat effectum*»²⁾. Основное свойство причин — их количественная неразрушимость и способность к качественному превращению. Отсюда вывод, что «силы суть неразрушимые, способные к превращениям, невесомые объекты»³⁾. В этой формулировке сказывается еще концепция невесомых флюидов, противопоставление весомой материи невесомой силе. Статья заканчивается указанием на необходимость установления эквивалентов различных сил и, в частности, механического эквивалента теплоты.

Майер не ограничился одной постановкой вопроса о механическом эквиваленте теплоты, но и впервые предложил оригинальный способ его вычисления. Поиски метода вычисления привели ученого из области физиологии в область физики. Подробности расчета механического эквивалента теплоты в рассматриваемой работе не приводятся. Они изложены в письмах к Бауру и Гризингеру, а затем в его последующих статьях. О работах других авторов на эту тему Майер ничего еще не знал.

В 1845 г. в Гейльбронне вышло отдельным изданием наиболее важное сочинение Майера «Органическое движение в связи с обменом веществ», в котором он изложил весь круг идей, относящихся к новому за-

¹⁾ Р. Майер, Закон сохранения и превращения энергии, стр. 68—69.

²⁾ Там же, стр. 75.

³⁾ Там же, стр. 77.

кону природы — закону сохранения «сил». Перебрасывая мост между органической и неорганической природой, он прямо говорит о всеобщности и универсальности своего закона: «Можно доказать а priori и во всех случаях подтвердить на опыте, что различные силы могут превращаться друг в друга. В действительности существует только одна-единственная сила. Эта сила в вечной смене циркулирует как в мертвой, так и в живой природе. Нигде нельзя найти ни одного процесса, где не было бы изменения силы со стороны ее формы!»¹⁾).

В этом же сочинении Майер вычисляет значение механического эквивалента теплоты. Весьма примечателен метод расчета этого отношения. Просматривая физические журналы, Майер обратил внимание на работы Гей-Люссака и Дальтона, в которых были описаны опыты над сжатием и расширением газов. В работах указывалось, что процессы расширения и сжатия воздуха сопровождаются изменением температуры газа. Майера заинтересовало указание Дальтона на то, что для нагревания газа до определенной температуры необходимы, в зависимости от условий опыта, различные количества теплоты. Это натолкнуло Майера на мысль сравнить количество теплоты, подведенное к газу, с работой расширения этого газа. Он правильно понял, что разность теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме для одного и того же газа должна быть численно равна работе расширения.

Эти соображения и были положены им в основу расчета: «Если тепло, которое получает газ, нагреваясь при постоянном объеме до t° , равно x , тепло же, необходимое газу для такого же повышения температуры при постоянном давлении, равно $x + y$ и если, далее, вес, поднятый в этом последнем случае, равен P , а высота его подъема равна h , то тогда $y = Ph$ »²⁾). Данная Майером формула в современных обозначениях имеет вид $c_p - c_v = R$ и называется в термодинамике формулой Майера.

¹⁾ Р. Майер, Закон сохранения и превращения энергии, стр. 93—94.

²⁾ Там же, стр. 103.

Используя современные ему данные о теплоемкостях воздуха Деляроша, Берара и Дюлонга, Майер вычисляет на основании своего уравнения численное значение механического эквивалента теплоты, которое получилось равным 367 кГм/ккал . Впоследствии он повторил свой расчет с более точными данными Реньо и нашел значение 425 кГм/ккал , что почти совпадает с современным значением.

Майер проделал свой расчет не только для воздуха, но и для некоторых других газов, значения теплоемкостей для которых были известны. Так как результат расчета не изменился, то он пришел к заключению об универсальности найденного им соотношения: «Закон „тепло равно механическому эффекту“ не зависит от природы упругой жидкости, которая служит лишь орудием для превращения одной силы в другую»¹⁾.

Во второй части своей работы немецкий ученый рассматривает энергетические процессы у растений и животных. Обращаясь здесь к вопросам, более близким его специальности, Майер по сути дела излагает свое философское кредо. Являясь стихийным материалистом, подходя к жизнедеятельности организма с точки зрения физико-химических превращений, он убедительно показывает несостоятельность учения виталистов (Либиха, Рейха и др.) о «жизненной силе». Источником механических и тепловых эффектов в живом организме является не таинственная «жизненная сила», а химические процессы, протекающие в нем в результате поглощения кислорода и пищи. Таким образом, жизнедеятельность организма рассматривается Майером с точки зрения смены форм энергии.

Из приведенного краткого обзора видно, какое богатство мыслей заключено в этой работе и как далеко ушел Майер в своих взглядах на единство сил природы от своих предшественников. Вместо единичных разрозненных фактов он нарисовал грандиозную картину взаимосвязи и взаимопревращений различных форм энергии. Это дает право считать Роберта Майера, замечательного естествоиспытателя, основоположником важнейшего закона современной науки.

¹⁾ Р. Майер, Закон сохранения и превращения энергии, стр. 105—106.

Рассмотренными тремя сочинениями исчерпываются важнейшие работы Майера, посвященные обоснованию закона сохранения и превращения энергии. В 1851 г., в связи с возникновением спора о приоритете с Джоулем, Майер опубликовал на эту тему еще одну работу «Замечания о механическом эквиваленте теплоты», в которой не содержится ничего принципиально нового по сравнению с его прежними работами.

Английский предприниматель, владелец большого пивоваренного завода, Джемс Джоуль не был профессиональным ученым. Однако уже с раннего возраста у него проявился интерес к научным занятиям, и этому роду деятельности он отдавал весь свой досуг. Особенно привлекали Джоуля малоразработанные в его время вопросы электричества и магнетизма, в частности тепловые действия тока. Начиная с 1841 г. он решает выяснить вопрос о природе теплоты, выделяемой электрическим током. Опыты, которые Джоуль ставил для этой цели, привели его к важным заключениям. Прежде всего он установил независимо от Ленца известный закон о пропорциональности количества теплоты, образованной током, квадрату силы тока. Отсюда следовало, что теплота не переносится током от его источника и не связана с теплотой химических процессов, протекающих в батарее.

Продолжая свои опыты с магнитоэлектрическими машинами, Джоуль приходит к выводу о взаимосвязи между теплотой и механической работой, затраченной на приведение машины в действие. Дальнейший ход мыслей должен был привести и действительно привел английского ученого к заключению о существовании определенного отношения между этой работой и выделенной током теплотой. Первая же попытка вычислить это отношение увенчалась успехом: Джоуль получил для него значение 460 кГм/ккал . Результаты своих исследований он изложил в работе «О тепловом эффекте магнитоэлектричества и механическом значении тепла», доложив ее Манчестерскому философскому обществу в августе 1843 г. Начиная с этого времени все усилия Джоуля были направлены на то, чтобы доказать постоянство найденного отношения во всех случаях, когда за счет

затраты механической работы выделяется теплота. Он проделывает огромное количество опытов с трением, расширением газов, с электрическим током и др. Описание этих опытов заняло целую книгу, которая под названием «Механический эквивалент тепла» ¹⁾ была опубликована в 1872 г.

Все опыты приводили в среднем к одному и тому же результату. В некотором несовпадении полученных числовых значений Джоуль правильно увидел отражение различий в методике проведения экспериментов и в их неизбежных погрешностях, по-видимому нисколько не сомневаясь в том, что значение механического эквивалента во всех случаях должно быть одинаковым.

Основные усилия Джоуля были направлены в первую очередь на возможно более точное определение механического эквивалента теплоты. Это, однако, не означает, что английский ученый не интересовался теоретическими вопросами, связанными с законом сохранения энергии. Во многих своих сочинениях Джоуль высказывает общие положения, свидетельствующие о широте мышления и понимании важности вновь открытого закона природы. Джоуль убежден в том, что «могучие силы природы, созданные велением творца, неразрушимы и что во всех случаях, когда затрачивается механическая сила, получается точное эквивалентное количество теплоты» ²⁾.

Джоулю принадлежат важные соображения, относящиеся к кинетической теории газов на заре ее становления. Эти соображения основаны также на опытах по определению механического эквивалента теплоты.

Несмотря на то, что между Джоулем и Майером возник спор о приоритете в определении механического эквивалента теплоты, формальным поводом к которому послужило отсутствие имени Джоуля в работе Майера «Органическое движение в связи с обменом веществ», сопоставление трудов обоих ученых показывает, что каждый из них пришел к великому от-

¹⁾ J. P. Joule, The Scientific papers, London, v. I, 1884, v. II, 1887.

²⁾ Цит. по кн.: Ф. Розенбергер, История физики, ч. III, в. 2, стр. 36.

крытию самостоятельным оригинальным путем. При этом Майер значительно шире подошел ко всей проблеме, не ограничиваясь только расчетом механического эквивалента. Как мы видели, в его трудах речь идет не только о сохранении «сил», но и об их качественных изменениях. По существу немецкий ученый впервые в истории науки поставил проблему о количественном сохранении различных форм движения при их качественном изменении. Подобная постановка вопроса в трудах Джоуля отсутствует.

Количественное выражение закона у Гельмгольца. Первые успехи закона сохранения и превращения энергии

Кроме Майера и Джоуля, в разработке закона сохранения и превращения энергии непосредственно в период его становления принимали участие и другие выдающиеся ученые, среди которых первое место принадлежит Гельмгольцу. Если Майер исходил из общей постановки вопроса, рассмотрев силы природы вообще, а Джоуль исследовал частную проблему превращения теплоты и механической работы и отсюда пришел к идее постоянства «сил», то великий немецкий естествоиспытатель Гельмгольц пришел к этой идее через отрицание учения виталистов о жизненной силе. Связав этот вопрос с невозможностью вечного двигателя, Гельмгольц сформулировал закон сохранения «сил» как всеобщий закон природы.

В 1847 г. двадцатипятилетний ученый выступил в незадолго перед тем организованном физическом обществе в Берлине с докладом на тему «О сохранении силы», который явился важнейшей вехой на пути к окончательной формулировке закона сохранения и превращения энергии. Заслуга Гельмгольца в том, что он проанализировал большое количество физических явлений (механических, электрических, оптических, тепловых) и показал, что важнейшие закономерности их протекания могут быть получены на основе закона сохранения «сил». Однако, увлекшись полученными результатами, Гельмгольц подошел к этому закону односторонне, только с количественной стороны, игнорируя не менее важную сторону — качественную.

Ф. Энгельс, первым обративший внимание на эту особенность работы Гельмгольца, ставил ее поэтому ниже исследований Майера. Энгельс отмечал, что в законе сохранения энергии качественная сторона не менее важна, чем количественная. Именно поэтому великий классик марксизма предложил заменить название «закон сохранения силы» выражением «закон сохранения и превращения энергии».

Игнорирование качественной стороны закона сохранения и превращения энергии привело даже крупных ученых к грубым методологическим ошибкам. Укажем в качестве примера на пресловутую «проблему тепловой смерти вселенной», возникшую в процессе развития термодинамики в середине прошлого века. В 1849—1850 гг. В. Томсон и Р. Клаузиус, независимо друг от друга рассмотрев идеи французского инженера Сади Карно, выдвинутые им еще в 1824 г. в период господства теории теплорода, с точки зрения закона сохранения и превращения энергии, сформулировали один из важнейших законов природы — второе начало термодинамики. «Проблема тепловой смерти вселенной» возникла в начальный период развития этого закона, когда его физический смысл и границы применения еще не были выяснены.

В 1852 г. В. Томсон опубликовал небольшую статью «О проявляющейся в природе общей тенденции к рассеянию механической энергии»¹⁾, в которой рассмотрел различные формы энергии с точки зрения их превращения в теплоту. При этом он отметил, что если «процесс переноса тепла от одного тела к другому, находящемуся при более низкой температуре, осуществляется какими-либо методами, не удовлетворяющими установленному Карно критерию об идеальной термодинамической машине, то происходит общая потеря механической энергии, которая могла бы быть использована человеком»²⁾. Обратив внимание на необратимый характер процессов, протекающих в природе, и поэтому невозможность полного возвращения растраченной механической энергии в первоначальное состояние, Томсон пришел к заключению

¹⁾ Сб. «Второе начало термодинамики», ГТТИ, М., 1934, стр. 178.

²⁾ Там же, стр. 180.

о том, что «восстановление механической энергии в прежнем ее количестве... не может быть осуществлено при помощи каких бы то ни было процессов»¹⁾. Следствием этого явился основной вывод Томсона: «В прошлом, отстоящем на конечный промежуток времени от настоящего момента, Земля находилась и спустя конечный промежуток времени она снова очутится в состоянии, непригодном для обитания человека, если только в прошлом не были проведены и в будущем не будут предприняты такие меры, которые являются неосуществимыми при наличии законов, регулирующих известные процессы, протекающие ныне в материальном мире»²⁾.

Если В. Томсон предрекал грядущую гибель только жизни на Земле, то Клаузиус пошел дальше, распространив его идеи на всю вселенную. Введя понятие энтропии как функции состояния, связанной со вторым началом термодинамики, и трактуя ее как меру рассеяния энергии, Клаузиус в одной из своих работ (1865 г.) дал следующую далеко идущую формулировку второго начала: «Энтропия мира стремится к максимуму»³⁾.

В другой работе, написанной в 1879 г. и называвшейся «О втором основном законе термодинамики», он сформулировал в качестве следствия из второго начала «проблему тепловой смерти вселенной»: «Чем больше вселенная приближается к предельному состоянию, в котором энтропия достигает своего максимума, тем больше исчезают поводы к дальнейшим изменениям, а если бы это состояние было, наконец, достигнуто, то не происходило бы больше никаких дальнейших изменений и вселенная находилась бы в некотором мертвом состоянии инерции»⁴⁾.

Таким образом, В. Томсон и Клаузиус как бы вынесли смертный приговор вселенной: неумолимый ход процессов в ней таков, что рано или поздно она должна будет прийти в состояние теплового равно-

¹⁾ Сб. «Второе начало термодинамики», стр. 182.

²⁾ Там же.

³⁾ R. Clausius, Wissenschaftliche Abhandlungen, Abt. II, Leipzig, 1867, s. 44.

⁴⁾ R. Clausius, Über die zweite Hauptsatz der mechanische Wärmetheorie, Braunschweig, 1879, S. 23.

весия, при котором всякие энергетические превращения прекратятся. Антинаучный, реакционный характер этой «проблемы» совершенно очевиден. Если законы термодинамики предвещают «конец мира», то, естественно, должно быть и его начало. «Начало» же миру мог положить только бог. Таким образом, открывалась возможность «научного» доказательства бытия бога. Именно поэтому «проблема тепловой смерти» была взята на вооружение многими представителями идеалистической философии.

Мы не имеем возможности в рамках этой книги останавливаться на различных аспектах решения этой «проблемы»¹⁾. Укажем, что первая научно обоснованная критика ее с позиций диалектического материализма была дана Ф. Энгельсом в «Диалектике природы». Энгельс указывает, что Клаузиус лишь только сформулировал те вопросы, которые вытекали из свойства необратимости природных процессов, не сделав по существу попытки глубоко разобраться в них. Поэтому его выводы из второго начала нельзя рассматривать как нечто абсолютное. Обращаясь к самой «проблеме», Энгельс отмечает, что «в каком бы виде ни выступало перед нами второе положение Клаузиуса,... согласно ему энергия теряется если не количественно, то качественно... Клаузиус... доказывает, что мир сотворен, следовательно, что материя сотворима, следовательно, что она уничтожима, следовательно, что и сила сотворима и уничтожима, следовательно, что все учение о „сохранении силы“ — бессмыслица»²⁾.

Таким образом, Энгельс указывает, что «проблема тепловой смерти» вселенной противоречит закону сохранения энергии, если только понимать этот закон широко, как утверждение неуничтожимости энергии и количественно и качественно. Последнее означает, что энергия сохраняет вечно свою способность превращаться из одной формы в другую. Отметим, что в свете данных современной науки эта «проблема» должна рассматриваться как одно из заблуждений человеческого разума на пути познания истины.

¹⁾ См. Д. П. Гохштейн, Остановятся ли мировые часы? Госэнергоиздат, М. — Л., 1963.

²⁾ Ф. Энгельс, Диалектика природы, 1964, стр. 249.

После этого отступления возвратимся к работе молодого Гельмгольца. В кратком введении он излагает свои взгляды на конечную цель и задачи естествознания, а затем переходит к изложению исходных положений и цели своего исследования: «Мы исходим из допущения, что невозможно при существовании любой произвольной комбинации тел природы получать непрерывно из ничего движущую силу... Задачей настоящего сочинения является проведение указанного принципа совершенно тем же способом через все отделы физики отчасти для того, чтобы доказать применимость его во всех тех случаях, где законы явлений уже достаточно изучены, частью с помощью этого принципа, опираясь на различные аналогии более известных явлений, сделать дальнейшие заключения о законах еще не вполне изученных явлений и дать, таким образом, в руки экспериментатора путеводную нить»¹⁾).

Прежде всего Гельмгольц обобщает принцип сохранения силы, введя понятие о «силах напряжения» или «напряженных силах» и понимая под этим термином потенциальную энергию. Отметим сразу же, что, говоря о силах, он всюду трактует это понятие в лейбницевском духе, т. е. как энергию. Обобщение им принципа сохранения «живой силы» состоит в том, что доказывается неизменность суммы сил напряжения и живых сил в замкнутых системах. Введение потенциальной энергии является важной заслугой Гельмгольца.

«Силу напряжения» Гельмгольц определяет как работу центральных сил с противоположным знаком. Введение этой величины Гельмгольцем позволяет распространить закон сохранения энергии на немеханические явления, так как если «живая сила» проявляет себя только в движении тел или отдельных молекул, то «сила напряжения» — в упругих, химических, электрических и других явлениях. Сформулировав принцип о том, что «всегда сумма существующих в системе напряженных сил и живых сил постоянна», Гельмгольц сделал важный шаг по пути к созданию единой физической картины мира.

¹⁾ Г. Гельмгольц, О сохранении силы, ГТТИ, М.—Л., 1934, стр. 38—39.

Здесь следует отметить, что, объединяя в понятие «напряженная сила» различные формы энергии, Гельмгольц действительно сумел значительно упростить исследование различных физических явлений. Но наряду с достигнутым упрощением это привело к полному игнорированию качественных особенностей различных форм энергии. Гельмгольц делает упор на количественной стороне закона сохранения энергии.

Далее он переходит к применению установленного общего принципа к конкретным физическим явлениям. Во всех случаях это применение основано на одной и той же схеме: находится сумма «живой силы» и «напряженной силы», затем эта сумма приводится к одной и той же мере, которой является мера «механической силы». Отсюда он получает выражение соответствующего физического закона. С указанной точки зрения рассматриваются, помимо механических, также явления электромагнетизма, распространение световых и звуковых волн. Гельмгольц впервые рассмотрел с энергетической точки зрения интерференцию световых волн. Большое внимание в своей работе он уделил энергетическому исследованию взаимосвязи тепловых явлений с явлениями электрическими и химическими. Во всех случаях энергетический подход позволил не только устранить имевшиеся раньше противоречия с опытом, но и дать правильное объяснение рассматриваемым явлениям.

Классическим примером применения «закона сохранения силы» можно считать анализ Гельмгольцем явления электромагнитной индукции и вывод ЭДС индукции. Этот вывод вошел теперь во все учебники физики.

В заключительной части своего доклада Гельмгольц указывает на возможность применения закона к объяснению процессов, протекающих в живом организме. Заканчивая исследование, он говорит: «Я думаю, что приведенные данные показывают, что высказанный закон не противоречит ни одному из известных в естествознании фактов и поразительным образом подтверждается большим числом их. Я постарался установить по возможности полно следствия, которые получаются из комбинации этого закона с известными до сих пор законами естественных явлений и которые

еще должны ожидать своего подтверждения на опыте. Цель этого исследования, которая может извинить мне и гипотетическую часть его, представить физикам в возможной полноте теоретическое, эвристическое и практическое значение этого закона, полное подтверждение которого должно быть рассматриваемо как одна из главных задач ближайшего будущего физики»¹⁾).

Таково в общих чертах содержание основополагающей работы Гельмгольца, которая, по словам Планка, «останется навсегда одним из замечательнейших и поучительнейших памятников в истории развития принципа сохранения силы»²⁾).

Исследование Гельмгольца не произвело на современных ему физиков заметного впечатления. Глубокие идеи, высказанные молодым ученым, требовавшие по существу пересмотра всего физического мировоззрения, не были поняты. Это и неудивительно, если вспомнить, что старшие современники Гельмгольца были воспитаны на метафизических представлениях о «силах». В работе «О сохранении силы» эти ученые не видели ничего принципиально нового, а только изложение на новый лад старого принципа «сохранения живой силы». Они утверждали, что здесь новые факты подведены под старую идею.

Только тогда, когда закон сохранения и превращения энергии занял прочное место в физической картине мира, стало ясно все значение небольшой гельмгольцевой работы. «Чтобы оценить все научное значение небольшой гельмгольцевой статьи об этом предмете (законе сохранения силы. — Я. Г.), — писал Максвелл в одной из своих статей, посвященных Гельмгольцу, — стоило бы только спросить тех, кому мы обязаны величайшими открытиями в термодинамике и в других отраслях современной физики: сколько раз они перечитывали эту статью и как часто при своих изысканиях чувствовали непреодолимую силу веских положений Гельмгольца»³⁾. Из всех работ, посвященных закону сохранения и превращения энергии

¹⁾ Г. Гельмгольц, О сохранении силы, стр. 115.

²⁾ М. Планк, Принцип сохранения энергии, стр. 55.

³⁾ Дж. Максвелл, Статьи и речи, Гостехиздат, 1940, стр. 179.

в период его становления, работа Гельмгольца была наиболее общей и обоснованной.

Рассмотренными в настоящей главе исследованиями основоположников закона сохранения и превращения энергии в современной его форме — Майера, Джоуля и Гельмгольца — заканчивается период его становления. В этих работах получили отражение три стороны развития закона — философско-теоретическая (Майер), экспериментальная (Джоуль) и математическая (Гельмгольц). Трое ученых, идя разными путями, сошлись в одном пункте: между различными видами «сил» существует количественное отношение, причем общей мерой этого отношения является лейбницевское понятие «силы» — энергия. Таким образом, старый спор о мере движения завершился. Стало ясно, что в рамках механики он не мог быть решен до конца, так как вопрос состоял в том, сохраняется ли кинетическая форма движения или же она изменяется. Правда, открытым еще оставался вопрос о том, почему механическое движение обладает двоякой мерой — количеством движения и живой силой. Ответ на этот вопрос был получен значительно позже.

Закон сохранения энергии и классическая физика второй половины XIX в.

Открытие закона сохранения энергии коренным образом изменило развитие классической физики во второй половине XIX в. Можно утверждать, что это величайшее открытие естествознания провело резкую грань между физикой первой половины XIX в. с ее метафизическими концепциями и физикой второй половины века, когда ее развитие стало на прочный фундамент. Важнейшая заслуга ученых, открывших и обосновавших закон, состоит в том, что они показали, как на его основе обобщить и связать ранее независимые области физики. Они показали также, что закон сохранения энергии является тем законом, который позволяет глубоко проникнуть в тайны природы и дать им обоснованное физическое толкование.

Примерно к 1860 г. споры вокруг закона сохранения энергии затихли. Подавляющему большинству естествоиспытателей, даже не связанных непосред-

ственно с физикой, стала ясна эвристическая и методологическая ценность нового закона природы, который с этого времени стал «незыблемой основой всего естествознания и исходным пунктом дальнейшего исследования»¹⁾. Что же касается непосредственно физиков, то они получили в свои руки безошибочный критерий для проверки физических теорий и гипотез: противоречие закону сохранения энергии указывало на неудовлетворительность данной теории. О той важности, которую придавали физики закону сохранения энергии, можно судить из следующих слов Фарадея: отказ от закона сохранения энергии был бы равносильен признанию «вечного движения, огня без тепла, тепла без источника теплоты, действия без противодействия, причины без действия, действия без причины... Подобно тому как химик обязан всем совершенством своей науки употреблению весов, никогда не обманывающих его на счет веса тела, физик может от начала сохранения ждать уверенности в выводах и главной помощи в исследованиях. Все, чем мы владеем, все, что есть у нас хорошего и верного, паровая машина, электрический телеграф и пр., суть свидетельства истины этого великого начала»²⁾.

Теперь в большинстве случаев физики в своих попытках осмыслить вновь открытое явление становились на путь поисков энергетических соотношений, рассматривая эти явления с точки зрения превращения одной формы энергии в другую и сводя вопрос в конечном счете к закону сохранения и превращения энергии. Фундаментальное значение энергии как сохраняющейся величины, видимо, уже в это время наводило физиков на мысль о значении вообще сохраняющихся величин в построении любой физической теории. Это можно проследить на примере развития классических теорий XIX в. — теории теплоты и электродинамики.

Именно закон сохранения и превращения энергии вызвал к жизни развитие фундаментальных физических теорий, коренным образом изменивших мировоззрение естествоиспытателей второй половины XIX в.

¹⁾ М. Планк, Принцип сохранения энергии, стр. 93.

²⁾ Цит. по кн.: Б. Г. Кузнецов, Принципы классической физики, стр. 258.

Эти теории привели в конечном счете к крушению столь милую сердцу физиков этого периода механистическую картину мира.

Сказанное касается прежде всего развития теории теплоты. К середине XIX в. господство теории теплорода было почти полностью подорвано рядом замечательных опытов, начиная с Румфорда и Дэви. Два аспекта теории теплоты — феноменологический и молекулярно-кинетический — пришли на смену теплороду и старой корпускулярной теории тепла. Открытие закона сохранения энергии позволило поставить на твердую почву разработку этих двух аспектов. Первое начало термодинамики, открытое Майером, и второе начало, сформулированное независимо друг от друга Клаузиусом и В. Томсоном в результате пересмотра идей Сади Карно с точки зрения новых энергетических представлений, заняли одно из руководящих мест в новой физической картине мира. Общность и универсальность начал термодинамики дали основание Ланжевену заявить, что начала термодинамики «по-видимому, окончательно останутся в качестве основы нашего представления о внешнем мире»¹⁾. В свою очередь методологические и философские вопросы, возникшие в связи с дальнейшим развитием этих законов и их применением к конкретным физическим системам, способствовали не только правильному пониманию природы тепловых явлений, но оказали также решающее влияние на формирование важнейших представлений современной физики. Именно развитие термодинамики и молекулярно-кинетической теории на рубеже XIX и XX вв. привело к великому открытию кванта действия, что предопределило весь ход развития физической науки в нашем веке.

Не менее важное значение получил закон сохранения энергии в развитии теории электричества и магнетизма. В первой половине XIX в. не существовало единой теории этих явлений. Наблюдения и разрозненные факты не были охвачены единой точкой зрения, так как не было еще той основы, которая позволила бы соединить их в одно целое. Такой основой явился за-

¹⁾ П. Ланжевен, Избранные произведения, ИЛ, 1948, стр. 48.

кон сохранения энергии. Планк выразил важность этого закона в области электрических и магнитных явлений в следующих словах: «Из всех выводов, которые принцип сохранения энергии позволяет сделать о законах действия различных существующих в природе сил, особо выдающийся интерес имеют те выводы, которые относятся к электричеству и магнетизму; ибо ни в какой другой области физики не выявляется так чисто и непосредственно плодотворность этого принципа... Беря на себя задачу отыскать законы электричества, мы видим, что не обладаем заранее никаким другим доступным вспомогательным средством исследования, кроме как единственно и исключительно принципом сохранения энергии. Следовательно, здесь наиболее выявляется значение принципа: освобожденный от всяких побочных представлений, он образует единственный надежный исходный пункт исследования, указывая руководящий ход идей, который является существенной предпосылкой для рационального исследования результатов эксперимента и наблюдений»¹⁾).

В качестве одного из примеров такого плодотворного применения закона сохранения энергии в теории электромагнетизма уже упоминался вывод ЭДС индукции, данный Гельмгольцем. Приведем еще один пример. Начиная с 1826 г., когда Савари произвел свои первые опыты с намагничиванием стальных игл, помещенных вблизи проволоки с разрядным током от лейденской банки, электрический колебательный разряд привлек большое число исследователей. Существенным вкладом в исследование этого явления явилась работа американского физика Дж. Генри, высказавшего предположение, что опыты Савари и других ученых можно понять, если допустить «существование главного разряда в одном направлении, а затем нескольких отраженных действий назад и вперед, каждое из которых является более слабым, чем предыдущие, продолжающихся до тех пор, пока не наступит равновесие»²⁾).

Как известно, в опытах Савари, наблюдавшего перемагничивание стальных игл, впервые выявился

¹⁾ М. Планк, Принцип сохранения силы, стр. 194—195.

²⁾ Дж. Генри, Колебательный разряд. В сб. «Из пред- истории радио», М., 1948, стр. 244.

периодический характер искрового разряда. В более четкой форме гипотеза о колебательном характере разряда лейденской банки была высказана Гельмгольцем спустя пять лет после опубликования статьи Генри. Гельмгольц, по-видимому, не знал этой работы американского физика. Вот что мы читаем по этому поводу в рассмотренном выше классическом исследовании «О сохранении силы»: «Разряд батареи (из лейденских банок. — Я. Г.) будем представлять не как простое движение электричества в одном направлении, но как течение его то в одну, то в другую сторону между двух обкладок в виде колебаний, которые делаются все меньше и меньше, пока, наконец, вся живая сила не будет уничтожена суммою сопротивлений»¹⁾. Этой гипотезой, которая, как мы видим, также основана на энергетических соображениях, Гельмгольц объясняет некоторые опытные факты, в том числе и те, что наблюдал Савари. В. Томсон, который одним из первых физиков стал ревностным пропагандистом закона сохранения и превращения энергии, в 1853 г. применил этот закон для построения математической теории колебательного разряда²⁾.

Упомянутые два примера (вывод ЭДС индукции и теория колебательного контура), а таких примеров, естественно, можно было бы привести больше, являются лишь иллюстрацией к словам Планка относительно роли, которую сыграл закон сохранения энергии в развитии теории электромагнетизма. Однако в полной мере все значение этого закона стало ясно в период создания классической электродинамики. Ее фундаментом явились принцип близкодействия и два закона сохранения — закон сохранения энергии и закон сохранения электрического заряда. Именно, признав роль среды (электромагнитного поля) как передатчика взаимодействий токов и магнитов, Максвелл неизбежно должен был прийти и действительно пришел к признанию того, что энергия этих взаимодействий должна быть локализована в поле с некоторой определенной объемной плотностью.

¹⁾ Г. Гельмгольц, О сохранении силы, стр. 83.

²⁾ В. Томсон, О проходящих электрических токах. В сб. «Из предистории радио», стр. 248.

Как будет показано в следующей главе, эта принципиально новая идея Максвелла имела решающее значение в дальнейшем развитии не только закона сохранения энергии и самого понятия энергии, но и других законов сохранения и в первую очередь закона сохранения количества движения. Исследования Пойнтинга, Герца, Лебедева и других физиков показали универсальное значение таких сохраняющихся величин, как энергия и импульс, и привели к распространению соответствующих законов сохранения из области механики на область электромагнетизма. Тем самым был сделан решающий шаг к признанию поля как объективной реальности и к дальнейшему обобщению законов сохранения в физике сегодняшнего дня.

Говоря о роли закона сохранения энергии в классической физике XIX в., следует иметь в виду не только развитие термодинамики и электродинамики. На основе этого закона удалось решить ряд вопросов и из других областей как физики, так и смежных наук — химии и биологии.

Закон сохранения энергии постепенно стал теоретической основой различных технических расчетов, связанных с превращением теплоты в механическую работу и обратно. Тем самым расчет тепловых машин, а в дальнейшем и вся теплотехника, становились на прочный научный фундамент.

В области химии закон сохранения энергии вместе с законом сохранения массы стал основой расчета различных химических реакций и сопровождающих их тепловых эффектов. Так возникла термохимия, наука, получившая впоследствии большое практическое значение.

Еще Р. Майер и Г. Гельмгольц говорили о том значении, которое должен был приобрести закон сохранения энергии для выяснения процессов, протекающих в органической природе. Этим же ученым, как указывалось выше, принадлежат и первые попытки его применения для этих целей. Дальнейшее развитие идей основоположников закона сохранения энергии действительно привело к ряду важных открытий.

Наконец, закон сохранения энергии дал также возможность предсказывать специфические эффекты, которые могли возникнуть при разнообразных энергетиче-

ческих превращениях. Одно из первых открытий подобного рода было сделано В. Томсоном, который предсказал новый тепловой эффект (помимо джоулева тепла и термоэлектричества) при прохождении тока через неравномерно нагретый проводник. Этот «эффект Томсона» был впоследствии обнаружен экспериментально французским физиком Леру.

Возникновение «энергетизма» и его критика В. И. Лениным

Успехи закона сохранения и превращения энергии в объяснении явлений природы привели некоторых ученых и философов к мысли о возможности создания всеобщей энергетической картины мира. На этом пути и возникло в конце 80-х и начале 90-х гг. прошлого века реакционное идеалистическое учение — философия «энергетизма».

Одной из основных причин, вызвавших к жизни это учение, была крутая ломка физических представлений о материи, начавшаяся в этот период под влиянием новейших физических открытий. Рушилось казалось бы непоколебимое здание механицизма, столь упорно возводившееся корифеями физической науки в течение многих десятков лет. И многие физики думали, что на смену механицизму должна прийти новая общая теория физических явлений, которая не должна содержать понятия материи. Место материи должна была занять единственная универсальная всеобъемлющая величина — энергия. Именно в этом и состояла основная сущность «энергетизма»: отбросить вовсе понятие материи, оторвать движение от материи и свести все многообразие явлений природы к единственному понятию энергии.

Из этого видна сугубо идеалистическая сущность «энергетизма». Еще яснее эта сущность стала при непосредственном рассмотрении основных работ основоположников «энергетизма» — немецких ученых В. Оствальда и Г. Гельма.

Не ставя перед собой задачу детально проследить за всеми аспектами развития «энергетизма», мы отметим лишь основные моменты. Свое учение в систематическом виде Оствальд изложил в двух сочинениях:

«Энергия и ее превращение» (1888 г.) и в «Лекциях по натурфилософии», которые он читал в Лейпцигском университете в период 1900—1901 гг.

После классических исследований основоположников закона сохранения и превращения энергии физическое содержание самого понятия энергии еще не было раскрыто достаточно полно. В нем оставалось еще много неясных моментов, требовавших дальнейшего исследования. Особенно это касалось потенциальной энергии. В период непосредственно после открытия закона сохранения энергии физики считали потенциальную энергию чисто условным понятием. Трудности с потенциальной энергией усугублялись еще и тем обстоятельством, что в 70-х гг. XIX в. стал распространяться взгляд на энергию как на нечто материальное, и ее стали наделять свойствами вещества. Распространение получили такие выражения, как «количество содержащейся энергии в теле», «запас энергии тела» и т. п.

Этой неясностью в понимании физического смысла потенциальной энергии и воспользовались «энергетики»: она дала им повод объявить несостоятельной любую попытку материалистического объяснения понятия энергии.

Со всей определенностью указанную точку зрения высказал Оствальд. Давая исторический обзор работ Майера, Джоуля и Гельмгольца, он в одной из своих лекций говорил: «Благодаря этим и некоторым другим попыткам в этом роде идея энергии мало-помалу приобрела права гражданства в науке. Но в соответствии с общим законом психологии это происходило таким образом, что новые идеи старались по возможности связать со старыми теоретическими и гипотетическими представлениями. Майер и его последователи в особенности твердо держались дуализма материи и энергии, которые они рассматривали как два понятия одинаковой важности. Относительно более частных гипотетических допущений, которые сводились к «толкованию» всех родов энергии как механической, мнения разделились: Джоуль и Гельмгольц принимали их, а Майер — нет.

Только после того, как прошло пятьдесят лет со времени открытия закона энергии, был серьезно иссле-

дован вопрос, в каком отношении находятся между собой материя и энергия. В противовес мнению, принятому вначале, что они — равнозначные понятия, мало-помалу развивалось воззрение, что отношение между ними еще теснее, а именно что они неразделимы. Невозможно, по крайней мере, ни понять, ни определить материю, не пользуясь при этом свойствами энергии. Что касается обратного, т. е. попытки понять энергию без материи, то на нее долго не решались, несмотря на то, что уже вскоре после обнародования закона энергии Ренкин, Максвелл и позже Гельмгольц видели и заявляли, что в действительности все, что мы узнаем о мире, заключается в знании существующих в нем отношений энергии. В общем, материи все-таки отводили по крайней мере роль носителя различных энергий; постепенно она, однако, достигла того почетного и покойного положения, которое занимает также «вещь в себе» Канта.

Попытаемся поэтому построить миросозерцание исключительно из энергетического материала, совершенно не пользуясь понятием материи»¹⁾).

Таким образом, в отличие от основоположников закона сохранения энергии, которые по собственному признанию Оствальда стояли в отношении этого закона на материалистических позициях и не отрывали энергии от материи, Оствальд строит «миросозерцание» исключительно на понятии энергии, игнорируя, а вернее, изгоняя вообще понятие материи из науки.

Но, отрицая материю, Оствальд все же не был последователен до конца. Его «энергетическая» философия при ближайшем рассмотрении явно носила черты эклектизма. Действительно, не материалистическим ли элементом этой философии является его утверждение о том, что «при всеобъемлющем значении, которое имеет энергия для всей совокупности наших представлений о естественных явлениях, мы должны считать ее, принимая во внимание закон ее сохранения, субстанцией в самом настоящем смысле этого слова (разрядка Оствальда. — Я. Г.). Она имеет

¹⁾ В. Оствальд, *Натурфилософия*, СПб., 1909, стр. 122—123.

столь же общий и необходимый характер, как пространство, но она несравненно многообразнее»¹⁾).

Таким образом Оствальд пытался соединить несоединимое — идеализм с материализмом.

Следует сказать, что в тот период своей деятельности, когда Оствальд не увлекался особенно вопросами философии, а занимался вопросами физико-химии, в которых он являлся крупным специалистом, он стоял в общем на материалистических позициях. Резкий поворот его в сторону идеализма, так же как и многих его современников, произошел под влиянием того «кризиса физики», который возник на рубеже столетий под влиянием новейших открытий в физике.

В 1895 г. на очередном съезде немецких естествоиспытателей и врачей в Любеке Оствальд выступил с центральным докладом на тему «Победа над научным материализмом»²⁾, вызвавшим острую дискуссию. Лейтмотивом доклада было утверждение о том, что материи как объективной реальности не существует и что поэтому все физические теории, связанные с понятием материи, не должны приниматься всерьез. В частности, это относилось к атомистике и молекулярно-кинетической теории, поскольку последние ставили своей целью познание физического строения материи.

Г. Гельм, профессор политехнической школы в Дрездене, принимавший деятельное участие в развитии «энергетики», писал в своей книге «Энергетика в ее историческом развитии» (1898 г.), что на съезде в Любеке «страсти ... разгорелись не вокруг атомистики и термодинамики и не вокруг энергетического обоснования механики: все это были детали. Существо спора вращалось вокруг нашего познания. По существу решался простой вопрос: или схоластика (так Гельм называл материализм. — Я. Г.), или энергетика — выбора не было»³⁾.

Сам Гельм еще в 1887 г. опубликовал большую работу «Учение об энергии», в которой развивал свои

¹⁾ В. Оствальд, *Натурфилософия*, стр. 205.

²⁾ W. Ostwald, *Die Überwindung des wissenschaftlichen Materialismus. Vortrag, gehalten in der dritten allgemeinen Sitzung der Versammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte zu Lübeck, Leipzig, 1895.*

³⁾ G. Helm, *Die Energetik nach ihrer gesichtlichen Entwicklung*, Leipzig, 1898, S. 366.

принципы «энергетики», используя их в трактовке основных термодинамических законов. В цитированной выше книге он поставил своей целью доказать, что энергетический подход к изучению явлений природы является единственно правильным. Давая обзор развития учения об энергии в механике, термодинамике и других разделах физики, Гельм пытался показать, что все стремления ученых, начиная с Майера, были направлены на то, чтобы обосновать всю физику на принципах «энергетизма», и что поэтому «энергетика» должна рассматриваться не только как общая физическая теория, но и как не менее общее философское учение.

В учении «энергетиков» были также сильны черты агностицизма. В частности, у Оствальда агностицизм заключался в его утверждении, что сущность явлений природы непознаваема. Его борьба против молекулярно-кинетической теории также в значительной мере связана с агностицизмом.

В борьбе против молекулярно-кинетической теории «энергетики» находили поддержку у Э. Маха, который также был ее последовательным противником.

Отрицательно «энергетики» относились и к механицизму. Механистический материализм был в свое время прогрессивным мировоззрением, пришедшим на смену средневековой схоластике и метафизике. Его прогрессивность заключалась в стремлении объяснить природу из нее самой, без вмешательства сверхъестественных сил, на основе лишь законов механики. Сводя все явления и процессы природы к взаимодействиям по законам механики атомам, уподобляемым материальным точкам, механисты таким путем надеялись познать закономерности природы. Программа механистов была достаточно четко сформулирована в трудах Гельмгольца, В. Томсона и других физиков. На первых порах на этом пути были действительно получены важные физические результаты, созданы обширные теории и среди них молекулярно-кинетическая теория Клаузиуса. Однако в дальнейшем все более очевидным становилась ограниченность механицизма, его неспособность объяснить качественное своеобразие физических явлений. Сводя все формы движения к механической, игнорируя, таким образом, качествен-

ное отличие одной формы движения от другой, механистическое мировоззрение в конце XIX в. по существу зашло в тупик, особенно после великих открытий этого периода.

Ошибка «энергетиков» в оценке механицизма заключалась в том, что они отрицали его прогрессивный в прошлом характер. Возражая против попыток механистов свести все формы движения к механической, а также против их научной методологии, в основе которой лежала атомно-молекулярная теория, «энергетики» могли ссылаться только на свое неверие в атомистику, на свое отрицание возможности познания явлений природы. Естественно, что, кроме этих доводов, «энергетики» ничего более убедительного привести не могли. Ограниченность механицизма была преодолена только диалектическим материализмом.

В конечном итоге борьба «энергетиков» против молекулярно-кинетической теории, как и вообще отрицание ими объективного существования материи, была борьбой против коренных принципов материализма. С большой убедительной силой этот факт был показан В. И. Лениным в его великом труде «Материализм и эмпириокритицизм». Необходимо отметить, что именно Ленин был первым философом, глубоко понявшим всю идеалистическую реакционную сущность «энергетизма». Именно Ленин вскрыл весь идеализм учения Оствальда и Гельма, показав, что его сущность состоит в отрыве движения от материи. Считая Оствальда «крупным химиком и мелким философом»¹⁾, Ленин показал, что его учение является лишь разновидностью «физического» идеализма. Ленин писал, что «Оствальд пытался избежать этой неминуемой философской альтернативы (материализм или идеализм) посредством неопределенного употребления слова «энергия», но именно его попытка и показывает лишь раз тщетность подобных ухищрений»²⁾.

В другом месте, говоря о «путанике Оствальде»³⁾, Ленин характеризует его энергетику как «путаный

¹⁾ В. И. Ленин, Полное собр. соч., т. 18, Госполитиздат, 1961, стр. 284.

²⁾ Там же, стр. 286.

³⁾ Там же, стр. 45.

агностицизм, спотыкающийся кое-где в идеализм»¹⁾).

Давая общую оценку «энергетике», Ленин писал: «Энергетика Оствальда — хороший пример того, как быстро становится модой «новая» терминология и как быстро оказывается, что несколько измененный способ выражения ничуть не устраняет основных философских вопросов и основных философских направлений. В терминах «энергетики» так же можно выразить материализм и идеализм (более или менее последовательно, конечно), как и в терминах «опыта» и т. п. Энергетическая физика есть источник новых идеалистических попыток мыслить движение без материи»²⁾).

Эта исчерпывающая ленинская характеристика энергетике весьма убедительно показывает всю ее несостоятельность, как философскую, так и физическую.

«Очевиден тот пункт, на котором споткнулся Оствальд: когда ликвидирован метафизический разрыв между материей и движением, то всякое проявление материи неизбежно выступает только через соответствующую форму движения. Так рассуждает диалектический материалист и всякий не свихнувшийся в идеализм естествоиспытатель. Но Оствальд не сумел прямо подняться от старого метафизического взгляда на материю и движение до диалектико-материалистического взгляда и скатился в идеализм; из того неоспоримого факта, что все проявления материи осуществляются только через движение, неразрывно связанное с материей, он сделал идеалистический вывод: раз не существует материи, отдельной от движения, значит, она не нужна вовсе, ее нет вообще, а существует только одно движение, одна чистая энергия. Так возникло «энергетическое мировоззрение», философской сущностью которого, как показал В. И. Ленин, был идеалистический отрыв движения от материи»³⁾).

Надо сказать, что многие ведущие физики, работавшие в период борьбы материализма с «энергетикой», не признавали последней. М. Планк, Л. Больц-

¹⁾ В. И. Ленин, Полное собр. соч., т. 18, Госполитиздат, 1961, стр. 243.

²⁾ Там же, стр. 289.

³⁾ История философии, Изд-во АН СССР, т. V, 1961, стр. 535.

ман, В. Вин, М. Лауэ, русские ученые А. Столетов и Н. Умов отрицали какое-либо прогрессивное значение учения Оствальда — Гельма. Напротив, они подчеркивали регрессивный характер «энергетики», считали ее тормозом на пути развития физической науки.

Так, В. Вин писал: «Энергетика вряд ли оказала какое-нибудь влияние на развитие физики. Она обещала больше, чем смогла выполнить, и с самого начала страдала последствиями того, что недостаточно ясно отграничилась от выводов аналитической механики. Стремление приверженцев энергетики устранить атомистическую гипотезу также оказалось неудачным. Как раз в последние годы (написано в 1918 г. — Я. Г.) атомистика повела к величайшим успехам, тогда как энергетика оказалась бесплодной»¹⁾.

М. Лауэ в своей краткой истории физики писал, что «энергетика исчезла, как многие другие заблуждения, со смертью ее защитников»²⁾.

Непримиримым противником «энергетики» был выдающийся австрийский физик Л. Больцман, основоположник статистических представлений в современной физике.

Под напором очевидных фактов ряд физиков, ранее примыкавших к учению Оствальда, стал отходить от него. В конце концов вынужден был признать всю тщетность борьбы за утверждение «энергетизма» и сам Оствальд. Он не мог уже закрывать глаза на то, что видели все: большие успехи атомистики в объяснении таких явлений, как радиоактивность, теория электричества, молекулярно-кинетическая теория газов. Все эти открытия, а также «изолирование и подсчет ионов в газах..., совпадение законов броуновского движения с требованиями кинетической теории газов... дают теперь даже самому осторожному ученому право говорить об экспериментальном подтверждении атомистической теории вещества. Тем самым атомистическая гипотеза поднята на уровень научно обоснованной теории»³⁾, — писал Оствальд в своем труде «Теоретическая химия».

¹⁾ В. Вин, Новейшее развитие физики, Одесса, 1922, стр. 67.

²⁾ М. Лауэ, История физики, М., 1956, стр. 104.

³⁾ W. Ostwald, Die theoretische Chemie, Leipzig, 1904, S. 8.

И все же Оствальд не преодолел своих заблуждений до конца: признав атомистику и несостоятельность «энергетики» как физического учения, он продолжал настаивать на ее признании как философской системы. Однако весь ход дальнейшего развития науки показал полную философскую несостоятельность «энергетизма».

Между тем учение «энергетиков» отнюдь не было предано забвению. Прошло несколько десятилетий, и оно вновь возродилось «на качественно новой основе». Причиной этого возрождения были новые успехи в развитии законов сохранения.

Материалистическая физика и философия отвергают идею о самостоятельном существовании энергии как некоей материальной субстанции. Точка зрения современной науки сводится к тому, что энергия, так же как и масса, является свойством материи, причем масса характеризует инертные и гравитационные свойства материи, а энергия связана с движением материи и является мерой превращения одной формы движения в другую.

ГЛАВА IV

Дальнейшее развитие понятий энергии и импульса

Трудности определения потенциальной энергии

После окончательного признания закона сохранения и превращения энергии и его успехов в объяснении явлений природы усилия ученых были направлены на выяснение физической природы энергии. И здесь они неожиданно столкнулись с трудностями, на преодоление которых пришлось затратить немало времени. Речь идет о потенциальной энергии, физический смысл которой представлялся достаточно туманным и неясным.

Гельмгольц, который, как мы видели, ввел это понятие в науку под названием «количества напряженных сил», не дал четкого его определения и не выяснил его физического смысла. Введение потенциальной энергии было для него лишь удобным приемом анализа на основе закона сохранения энергии различных физических явлений и процессов. При этом с понятием потенциальной энергии не связывалось никакого реального образа, как это было в отношении кинетической энергии — энергии движущегося тела. Ранее уже говорилось о трудностях в отношении потенциальной энергии. А. Пуанкаре заметил по этому поводу: «Чтобы материализовать энергию, ее нужно локализовать; в отношении кинетической энергии это просто, но не так дело обстоит с энергией потенциальной. Где локализовать потенциальную энергию, вызванную притяжением двух небесных тел? В одном из двух?

В обоих? В промежуточном пространстве?»¹⁾). Неясно было также, почему потенциальная энергия зависела от конфигурации отдельных частей системы и даже от других тел, не входящих в данную систему.

Одним из первых сделал попытку внести ясность в понятие потенциальной энергии русский физик Н. А. Умов. Его исследования в этом направлении представляют определенный интерес, тем более, что в своей основе они были материалистическими. Идеи Умова основаны на учете роли промежуточной среды в процессах превращения энергии и, следовательно, исходят из концепции близкодействия.

Еще в XVII в. по вопросу о роли среды наместились две противоположные точки зрения. Одна из них, восходящая к Ньютону, признавала действие на расстоянии и существование пустого пространства. Таким образом, здесь роль среды как передатчика взаимодействия полностью игнорировалась.

Другая точка зрения, истоки которой восходят к Декарту, опиралась на идею близкодействия и отводила среде решающую роль в передаче энергии взаимодействия. Обе концепции имели как своих последователей, так и своих противников. Спор продолжался достаточно долго, пока благодаря трудам Фарадея и Максвелла роль промежуточной среды (в их теориях — эфира) не была достаточно выяснена в электромагнитных явлениях. Этим была окончательно подорвана концепция дальнодействия, а понятие поля, пришедшее на смену механистическому эфиру, показало полную ее несостоятельность. Умов писал в одной из своих работ, что «теперь идея о возможности взаимодействия между телами на расстоянии без посредствующей среды, всегда противная уму естествоиспытателей, оставлена наукой... Действие не передается через пустоту, а только через материю»²⁾.

В период 1872—1873 гг. ученый³⁾ в исследованиях «Теория простых сред и ее приложение к выводу ос-

¹⁾ А. Пуанкаре, Идеи Герца в механике, в кн.: Г. Герц, Принципы механики, изложенные в новой связи, Изд-во АН СССР, 1959, стр. 324—325.

²⁾ Н. А. Умов, Собр. соч., т. III, СПб., 1916, стр. 107.

³⁾ О мировоззрении Умова см. кн.: А. С. Компанеев, Борьба Н. А. Умова за материализм в физике, Изд-во АН СССР, 1954.

новых законов электростатических и электродинамических взаимодействий» и «Теория взаимодействий на расстояниях конечных и ее приложение к выводу электростатических и электродинамических законов» развивает свою трактовку понятия потенциальной энергии, пронизанную идеей о роли среды.

Умов указывает, что господствующая точка зрения на потенциальную энергию неверна, так как не раскрывает физического смысла этого понятия. «Если при падении камня вниз восстанавливается скорость, которую он потерял, когда двигался, то в какой форме и где существует энергия камня, им потерянная? Говорят, что она превратилась в энергию потенциальную и запас этой энергии находится в камне»¹⁾. В действительности же, согласно Умову, потенциальная энергия заключена не в камне, а в системе камень — Земля, включая в эту систему и промежуточную среду. Процесс исчезновения явного движения есть процесс постепенного превращения его «живой силы» в «живую силу» бесконечно малых движений частиц среды. «Единственно правильное представление о процессе превращения кинетической энергии в потенциальную, которое удовлетворило бы требование физического объяснения фактов, заключается в следующем: кинетическая энергия центров переходит на частицы промежуточной среды и наоборот. Переменная часть потенциальной энергии представляет количество живой силы, перешедшей с относительного движения центров на весьма малые движения частиц промежуточной среды, не подлежащей нашему наблюдению. Другими словами: изменения суммы живых сил движений центров равны, но противоположны по знаку изменениям живой силы весьма малых движений частиц промежуточной среды»²⁾.

Умов подчеркивал, что толкование потенциальной энергии как некоторого напряженного состояния по существу приводит к уничтожению кинетической энергии.

¹⁾ Н. А. Умов, Теория простых сред и ее приложение к выводу основных законов электростатических и электродинамических взаимодействий, Одесса, 1873, стр. 4.

²⁾ Н. А. Умов, Теория взаимодействий на расстояниях конечных и ее приложение к выводу электростатических и электродинамических законов, М., 1873, стр. 5.

С этой точки зрения непонятно, как превращается кинетическая энергия движущегося камня в какое-то его напряженное состояние, которое ничем не отличается от состояния того же камня, лежащего на земле.

Русский физик, как мы видим, развивал учение о потенциальной энергии, тесно связанное с представлением о поле как объективной реальности и с законом сохранения и превращения энергии. Он предлагал несколько видоизменить формулировку последнего с тем, чтобы в ней была особо подчеркнута роль среды. Согласно Умову, закон сохранения и превращения энергии можно свести к следующим трем положениям: а) всякое изменение в величине «живой силы» обуславливается ее переходом с частиц одной среды на частицы других сред или же с одних форм движений на другие; б) определенное количество «живой силы» остается себе равным при всякой смене явлений; в) количество «живых сил» природы неизменно. Логическим следствием учения Умова о роли промежуточной среды явились его замечательные новаторские идеи о локализации и движении энергии в пространстве, которые будут рассмотрены в следующем параграфе.

Если в исследованиях Умова понятие потенциальной энергии получило достаточно четкое и конкретное физическое развитие, то некоторые ученые указанные выше трудности с потенциальной энергией использовали для того, чтобы совсем изгнать это понятие из науки. Мы остановимся на одной попытке такого рода, принадлежащей немецкому физику Генриху Герцу. Незадолго до своей смерти, в конце 90-х гг. прошлого века, Герц развивал оригинальную систему механики, в которой, помимо всего прочего, пытался обойтись без понятия потенциальной энергии. Вот что он писал в своем труде «Принципы механики, изложенные в новой связи» (1894 г.): «Многие выдающиеся физики так усиленно пытаются в настоящее время приписать энергии свойства вещества, что принимают, будто любая, даже малейшая часть энергии связана в любой момент с определенным местом в пространстве и при всякой перемене этого места и при всех превращениях энергии в новые формы все же сохраняет свою идентичность... Особая трудность обуславливается уже

тем обстоятельством, что энергия, имеющая, якобы, характер вещества, проявляется в двух совершенно различных формах, которые соответствуют кинетической и потенциальной формам. Кинетическая энергия не нуждается в сущности ни в каком новом основном определении, так как она может быть выведена из понятий скорости и массы; потенциальная же энергия, которая требует самостоятельного определения, не поддается вначале никакому определению, которое приписывало бы ей свойства вещества. Некоторое количество какого-либо вещества представляет собой неизбежно положительную величину; потенциальную же энергию, содержащуюся в какой-либо системе, мы без всяких опасений принимаем в качестве отрицательной величины. Если какое-либо аналитическое выражение обозначает некоторое количество вещества, то аддитивная постоянная в этом выражении является такой же важной, как и все остальные; в выражении же потенциальной энергии системы аддитивная постоянная не имеет никакого значения. Наконец, содержание вещества в физической системе может зависеть только от состояний самой системы; содержание же потенциальной энергии в данной материи зависит от существования отдельных масс, которые, возможно, никогда не оказывали влияния на систему. Если вселенная и вместе с этим количество упомянутых масс бесконечны, то существует и бесконечное число многочисленных форм потенциальной энергии в конечных количествах материи. Все это — затруднения, которые следовало бы устранить или обойти при помощи искомого определения энергии»¹⁾).

Герц пытался обойти эти трудности тем, что в своей системе механики сводил потенциальную энергию к кинетической энергии скрытых движений частиц тела. В таком направлении он и разработал учение об энергии в механике. Однако это учение встретило много возражений и не было признано удовлетворительным. По существу Герц пытался свести качественно различные формы движения к механическому перемещению «скрытых масс». Его

¹⁾ Г. Герц, Принципы механики, изложенные в новой связи, стр. 38.

неудача лишний раз показала несостоятельность механицизма.

Понятие потенциальной энергии тесно связано с понятием поля как особой формы материи, и поэтому отрицание потенциальной энергии, как это пытался сделать Герц, равносильно отрицанию поля как объективной реальности.

Развитие теории электромагнетизма и учение о локализации и потоке энергии

Теория электромагнитного поля, созданная классическими трудами Максвелла, расширила содержание понятий энергии и импульса и соответствующих им законов сохранения. Обобщившая фундаментальные исследования Био, Савара, Фарадея и др. теория Максвелла, хотя и с трудом воспринятая его современниками, вскоре превратилась в руководящую физическую теорию и не утратила своего значения и в наше время. Максвелл смело перенес понятие энергии из области механики в область электромагнетизма, наделив электромагнитное поле внутренней энергией. Это позволило ему сразу же ввести в формальные уравнения поля определенное физическое содержание. Являясь представителем механистической физики, Максвелл, правда, еще не видел качественного отличия энергии поля от механической энергии: «Всякая энергия есть то же, что механическая энергия, существует ли она в форме обычного движения или в форме упругости, или в какой-либо другой форме. Энергия в электромагнитных явлениях — это механическая энергия»¹⁾.

Принципиально новым моментом в теории Максвелла явился вопрос о локализации энергии. Если согласно старым, домаксвелловским концепциям энергия находилась «в наэлектризованных телах, проводящих цепях и магнитах в форме неизвестного количества, называемого потенциальной энергией или способностью производить определенные действия на расстояниях»¹⁾, то согласно Максвеллу энергия нахо-

¹⁾ Дж. Максвелл, Избранные сочинения по теории электромагнитного поля, М., 1952, стр. 301.

дится в электромагнитном поле и проявляется в других формах, «которые могут быть описаны... согласно весьма вероятной гипотезе как движение и напряжения одной и той же среды»¹⁾).

Распространение закона сохранения энергии на электромагнитное поле неизбежно привело к представлению о потоке энергии. Действительно, если электромагнитная энергия, локализованная в некоторой области поля, может увеличиваться или уменьшаться, то это означает, что она в этой области либо превращается в другие формы, либо приходит или уходит из нее. А так как, согласно концепции близкодействия, энергия взаимодействия может распространяться только через посредство поля, то отсюда следует, что в электромагнитном поле должно существовать непрерывное движение энергии, или, как принято говорить, поток энергии. Именно в таком направлении развил теорию потока энергии в электромагнитном поле английский физик Дж. Пойнтинг (1884 г.).

Пойнтинг не знал, что десятью годами раньше учение о потоке энергии было развито Умовым и что из теории русского физика его результат следовал как частный случай. Учение о потоке энергии Умов первоначально разработал для упруго деформированных тел. В упомянутой выше работе «Теория простых сред» и главным образом в диссертации «Уравнения движения энергии в телах» (1874 г.) он, основываясь на концепции близкодействия, перенес идеи гидродинамики на движение энергии. Как движущаяся жидкость несет дополнительно энергию, пропорциональную скорости ее частиц и давлению, точно так же любой элемент объема среды, в которой частицы находятся в движении, всегда включает определенное количество энергии, поскольку кинетическая энергия движущейся частицы всегда находится вместе с частицей в данном месте пространства. При этом Умов отнюдь не считал энергию материальной, не отождествлял ее с веществом. Он использовал лишь формальную аналогию между дифференциальными уравнениями гидродинамики и движения энергии, которая является в

¹⁾ Дж. Максвелл. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля, М., 1952, стр. 505.

свою очередь следствием того, что как вещество, так и энергия подчиняются законам сохранения: «Насколько движение энергии и движение сжимаемого вещества обуславливаются законами их сохранения, настолько мы имеем право уподоблять движение энергии движению независимого и сжимаемого вещества»¹⁾. Составляя уравнение баланса энергии для элемента объема среды, он доказал важное положение, что «всегда существуют три функции l_x , l_y , l_z , обладающие тем свойством, что сумма их первых производных по осям x , y , z дает уменьшение плотности энергии в единицу времени в данной точке среды». В современной математической форме это записы-

вается: $\frac{dw}{dt} + \text{div}(\omega \mathbf{l}) = 0$. Здесь \mathbf{l} — вектор скорости упругих смещений, ω — плотность энергии. Произведение $\omega \mathbf{l}$ получило название вектора Умова. Умову принадлежит также доказательство теоремы о том, что количество энергии, проходящее через элемент поверхности среды в единицу времени, равно силе давления, действующей на этот элемент, умноженной на скорость его движения. В применении к электромагнитному полю из этой теоремы следует гипотеза Максвелла о световом давлении, а также вывод, что волна любой природы должна оказывать давление на препятствие, на которое она падает.

Идеи Умова были новыми для физики последней четверти XIX в. и не были оценены современниками. В своей автобиографии русский ученый вспоминал, что во время защиты диссертации понятия о движении энергии и ее плотности встретили сильное возражение со стороны оппонентов, которые считали их необоснованными и лишены физического смысла. Но пришло время, когда без этих понятий стало невозможно представить себе содержание важнейших физических теорий. Учение Умова о потоке энергии оказало большое влияние на развитие представлений об энергии и вошло во все учебники физики.

Пойнтинг, основываясь на фарадей-максвелловской концепции близкодействия, развил теорию пото-

¹⁾ Н. А. Умов, Избранные сочинения, Гостехиздат, М. — Л., 1950, стр. 152—153.

ка электромагнитной энергии. Его интересовало, каким образом электрическая и магнитная энергия переходит от одной области поля к другой, где она может превращаться в теплоту или в другие формы энергии. Он пишет: «Если мы признаем непрерывность движения энергии, т. е. признаем, что при исчезновении энергии в одной точке и появлении в другой она должна была пройти через промежуточное пространство, то мы принуждены сделать вывод, что окружающая среда содержит по крайней мере часть энергии и способна передавать энергию от точки к точке»¹⁾. Закон, по которому происходит передача энергии, Пойнтинг формулирует следующим образом: «Энергия в любой точке движется перпендикулярно к плоскости, содержащей линии электрической и магнитной сил, и... количество энергии, проходящей через единицу поверхности этой плоскости в секунду, равно произведению величин этих двух сил, умноженному на синус угла между ними и деленному на 4π . Направление же потока энергии совпадает с направлением движения правого винта при его вращении от положительного направления электродвижущей силы к положительному направлению магнитной силы»²⁾. В современных обозначениях вектор Пойнтинга, выражающий поток электромагнитной энергии, имеет вид: $\mathbf{S} = \frac{c}{4\pi} [\mathbf{E}\mathbf{H}]$, где \mathbf{E} и \mathbf{H} — напряженности электрического и магнитного полей. Он связан с плотностью энергии w соотношением $|\mathbf{S}| = wc$.

Применение закона сохранения и превращения энергии к электромагнитному полю привело Пойнтинга к доказательству важной теоремы: «Изменение суммы заключенных внутри поверхности электрической и магнитной энергий в секунду вместе с теплом, развиваемым токами, равно величине, в которую каждый элемент поверхности вносит свою долю, зависящую от значений электрической и магнитной сил на этом элементе»³⁾. Пойнтинг подчеркивает, что

¹⁾ Дж. Пойнтинг, О переносе энергии в электрическом поле. В сб. «Из предистории радио», стр. 233.

²⁾ Сб. «Из предистории радио», стр. 234.

³⁾ Там же, стр. 235.

полное изменение энергии получается при этом только в том случае, если принять во внимание найденный им закон для потока энергии. В современных обозначениях эта теорема может быть записана в виде

$$-\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} = A - Q + \frac{c}{4\pi} \int [\mathbf{E}\mathbf{H}]_n ds,$$

где $\mathcal{E} = \frac{1}{8\pi} \int (\epsilon \mathbf{E}^2 + \mu \mathbf{H}^2) dV$ — электромагнитная энергия, содержащаяся в объеме V , Q — джоулево тепло, A — работа сторонних сил. Интеграл $\frac{c}{4\pi} \int [\mathbf{E}\mathbf{H}]_n ds$ представляет собой поток вектора Пойнтинга через поверхность, ограничивающую данный объем. Полученные результаты Пойнтинг применяет к различным частным проблемам, в том числе к электромагнитной теории света¹⁾. Исследование Пойнтинга еще раз показывает, что закон сохранения и превращения энергии в области теории электромагнетизма привел к фундаментальным, далеко идущим заключениям.

Прямым следствием теории Максвелла был вывод об электромагнитной природе света, вывод, который привел в конечном счете к расширению понятия импульса и закона сохранения импульса.

Электромагнитная теория света. Импульс и масса электромагнитного поля. Исследования Дж. Томсона

Создавая свою теорию, Максвелл вряд ли думал о том, что она перебросит мост между такими в то время далекими разделами физики, как электромагнетизм и оптика. Однако это случилось, и именно в этом — огромное значение электромагнитной теории. Она не только объяснила большую совокупность известных фактов, но и предсказала вплоть до количественной оценки существование новых, неизвестных ранее явлений. Прекрасно об этом сказал Герц: «Нельзя изучать эту чудесную теорию без того, чтобы по-

¹⁾ Подробно см. Д. Д. Гуло, Из истории учения о движении энергии. В сб. «История и методология естественных наук», вып. II, Физика, Изд-во МГУ, 1963, стр. 135. См. также вып. III, 1965, стр. 214.

рою не возникало ощущения, что математическим формулам присущи самостоятельная жизнь и собственный разум, что они умнее нас, умнее даже открывшего их, что они дают больше, чем в них было ранее вложено»¹⁾).

Одним из таких блестящих предсказаний теории Максвелла был вывод об электромагнитной природе световых волн. Этот вывод имел решающее значение не только для дальнейшего развития физической теории, но и огромное практическое значение, так как из него родилась современная радиотехника. Остановимся несколько подробнее на этом открытии Максвелла. Минувя отдельные догадки о связи между электрическими и световыми явлениями, которые можно встретить в трудах Ломоносова, Эйлера и некоторых других ученых XVIII в., мы встречаем у Мак-Куллоха и Римана (30—50-е гг. XIX в.) утверждения о связи электромагнитных и световых явлений. Так, последний прямо говорит в своей небольшой заметке «По поводу электродинамики» о тесной «связи теории электричества и магнетизма с теорией света и лучистой теплоты»²⁾. Однако, по-видимому, Фарадей был первым, у кого мы находим в более или менее отчетливой форме гипотезу об электромагнитной природе света. В письме к Филиппсу «Мысли о лучевых колебаниях», опубликованном в мае 1846 г., мы читаем: «Нельзя ли предположить, что колебания, которые в известной теории принимаются за основу излучения и связанных с ним явлений, происходят в линиях силы, соединяющих частицы, а следовательно, массы материи в одно целое? Эта идея, если ее допустить, освободит нас от эфира, являющегося с другой точки зрения той средой, в которой происходят эти колебания»³⁾.

Эти мысли Фарадея Максвелл сам считает прообразом будущей электромагнитной теории света, как это видно из следующих его слов: «Электромагнитная

1) Г. Герц, О соотношениях между светом и электричеством, в сб. «Из предистории радио», 1948, стр. 196.

2) Б. Рима н, По поводу электродинамики, Сочинения, Гостехиздат, 1948, стр. 443.

3) М. Фарадей, Экспериментальные исследования по электричеству, т. III, 1959, стр. 618.

теория света, предложенная Фарадеем в «Мыслях о лучевых колебаниях» или «Экспериментальных исследованиях», — это по существу то же, что я начал развивать в этой статье («Динамическая теория электромагнитного поля»), за исключением того, что в 1846 г. не было данных для вычисления скорости распространения»¹⁾.

«Динамическая теория электромагнитного поля» — работа Максвелла, которая, как говорит Джинс, является, вероятно, наиболее важным и имевшим наибольшее влияние из всех написанных им мемуаров вообще, была опубликована в 1865 г. Здесь впервые были изложены основы электромагнитной теории света вместе с некоторыми известными в то время экспериментальными фактами, ее подтверждающими. Но еще раньше, в 1861 г., Максвелл в одном из своих писем Фарадею сообщает об основном экспериментальном факте, который окончательно убедил его в дальнейшем в тождестве световых и электромагнитных волн: «Из определенного Кольраушем и Вебером численного отношения между статическим и магнитным действием электричества я определил упругость среды в воздухе и, считая, что она тождественна с упругостью светового эфира, определил скорость распространения поперечных колебаний. Результат — 193 088 миль в секунду. Физо определил скорость света в 193 118 миль в секунду прямым опытом»²⁾. Это было первым упоминанием о великом открытии Максвелла. Помимо совпадения числовых значений электродинамического коэффициента (отношения электростатической и электромагнитной единиц силы тока) и скорости света, важным аргументом в пользу электромагнитной природы света являлся также теоретический вывод Максвелла о поперечности электромагнитных колебаний, вытекающий из его основных уравнений. Наконец, теория Максвелла приводила непосредственно к зависимости между оптическими и электрическими и магнитными характеристиками среды:

¹⁾ В. Брэгг, История электромагнетизма, Гостехиздат, 1947, стр. 32.

²⁾ Дж. Максвелл, Избранные сочинения по теории электромагнитного поля, стр. 657.

если ϵ — диэлектрическая проницаемость (по Максвеллу — удельная индуктивная емкость), μ — магнитная проницаемость (по Максвеллу — коэффициент магнитной индукции), а n — показатель преломления среды, то $n^2 = \epsilon\mu$. Этот вывод также говорил в пользу электромагнитной теории света. Все это вместе взятое дало основание английскому физiku заключить, что «наука об электромагнетизме ведет к совершенно таким же заключениям, как и оптика, в отношении направления возмущений, которые могут распространяться через поле; обе эти науки утверждают поперечность этих колебаний и обе дают ту же самую скорость распространения»¹⁾.

Все предсказания теории Максвелла были подтверждены в разное время экспериментально. Вывод о том, что свет — электромагнитные волны, нашел в этих экспериментах свою решающую поддержку.

В итоговом сочинении — «Трактате об электричестве и магнетизме» (1873 г.) Максвелл обобщил свои многолетние исследования в области электричества и магнетизма, а также многочисленные экспериментальные данные, появившиеся в период его работы над электромагнитной теорией и ставившие своей целью проверку тех или иных выводов этой теории. Электромагнитная теория света находит здесь свое дальнейшее развитие. Важнейшим, фундаментальным выводом теории является вывод о давлении света, который Максвелл получает из энергетических соображений: «В среде, в которой распространяются волны, существует давление в направлении, нормальном к волнам, численно равное энергии в единице объема»²⁾. Здесь же излагается идея эксперимента, который мог бы обнаружить это давление: «Плоское тело, подвергающееся действию солнечного света, будет испытывать это давление только на своей освещенной стороне и, следовательно, будет отталкиваться от той стороны, на которую падает свет. Возможно, что значительно бо́льшая энергия излучения могла бы быть

1) Дж. Максвелл, Избранные сочинения по теории электромагнитного поля, стр. 323.

2) Там же, стр. 563.

получена при помощи концентрированных лучей электрической лампы. Такие лучи, падая на тонкий металлический диск, весьма чувствительным образом подвешенный в вакууме, возможно, произвели бы могущий быть наблюдаемым механический эффект»¹⁾). Максвелл произвел также теоретический расчет светового давления и получил для него, как и следовало ожидать, малую величину. Идея английского физика об экспериментальном определении величины светового давления была осуществлена спустя почти три десятилетия в виртуозных опытах П. Н. Лебедева.

Важнейшим методологическим следствием электромагнитной теории было развитие представлений о поле как объективной реальности, как об особой форме материи. Из факта существования светового давления с необходимостью следовало, что поле обладает импульсом. Сам Максвелл, в полном соответствии с механистической физикой своего времени, не рассматривал импульс электромагнитного поля как величину, непосредственно присущую полю. Точно так же он не видел еще качественного отличия энергии поля от механической энергии. Согласно Максвеллу, механические эффекты поля есть результат присущих эфиру статических натяжений и давлений. Но как бы там ни было, теория Максвелла приводила к заключению, что полю присущи важнейшие динамические свойства, которые в случае вещества характеризуются понятиями энергии и импульса. Отсюда по логике вещей нетрудно было прийти к заключению, что поле должно обладать и массой, которая в этом случае выступала как мера его инертных свойств.

О том, что поле обладает инертностью, говорили некоторые электромагнитные явления, в частности открытое Фарадеем явление электромагнитной индукции. Полное же обоснование этого факта связано прежде всего с трудами выдающегося ученого Дж. Дж. Томсона. В 1881 г. он делает существенный шаг в развитии теории поля и в обосновании его материальной природы, введя понятие об электромагнитной массе. Рассмотрим идеи Томсона, придерживаясь его работы

¹⁾ Дж. Максвелл, Избранные сочинения по теории электромагнитного поля, стр. 563.

«Об электродинамическом и магнитном эффекте, производимом движением наэлектризованных тел».

Как известно из электродинамики, движение электрически заряженного тела всегда сопровождается возникновением магнитного поля. При этом магнитное поле сообщает телу некоторую дополнительную инертность, связанную с тем, что на создание поля неизбежно затрачивается определенная работа.

Томсон рассматривает движение с некоторой скоростью u электрона, уподобляемого заряженной по поверхности сфере радиусом a и зарядом e , и вычисляет дополнительную инертность, которая обусловлена магнитным полем движущегося заряда. Поскольку мерой инертности является масса, то полученный расчет приводит его к понятию электромагнитной массы как меры инертности магнитного поля.

Движущийся заряд можно рассматривать как элемент электрического тока, величина которого пропорциональна заряду e и скорости u . В соответствии с законом Био — Савара напряженность магнитного поля, образованного этим зарядом в точке, отстоящей на расстоянии r (причем $r > a$) от центра сферы, будет равна $H = \frac{eu \sin \theta}{c^2 r^2}$, где θ — угол между радиусом-вектором r и направлением движения. Энергия единицы объема магнитного поля в вакууме равна $H^2/8\pi$. Поэтому энергия магнитного поля, образованного движущейся сферой, будет выражаться интегралом

$$\mathcal{E}_m = \int_0^\infty \int_0^\pi \frac{e^2 u^2 \sin^2 \theta}{8\pi c^2 r^4} 2\pi r^2 \sin \theta d\theta dr,$$

вычисляя который получим для магнитной энергии выражение $e^2 u^2 / 3ac^2$, где c — скорость света в вакууме.

Поскольку электрон, помимо массы электромагнитного происхождения, обладает еще и обычной массой m , то его кинетическая энергия будет равна $mu^2/2$ и соответственно полная энергия, равная сумме кинетической и магнитной энергий,

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m + \mathcal{E}_k = \frac{e^2 u^2}{3ac^2} + \frac{1}{2} mu^2 = \frac{1}{2} \left(m + \frac{2}{3} \frac{e^2}{ac^2} \right) u^2.$$

Выражение в скобках играет роль массы покоящегося или движущегося с небольшой скоростью электрона (Томсон проделал расчет в предположении, что $u \ll c$). Отсюда Томсон заключил, что электромагнитная масса электрона равна $\frac{2}{3} \frac{e^2}{ac^2}$: «Итак, энергия такова, как если бы масса сферы была $m + \frac{2}{3} \frac{e^2}{ac^2}$ вместо m ... Это очень важный результат, так как он показывает, что часть массы заряженной сферы обязана своим происхождением ее заряду»¹⁾. Если расчет произвести в предположении равномерного распределения заряда сферы по всему ее объему, то результат был бы тот же за исключением числового множителя.

При скоростях движения электрона, близких к скорости света, энергия магнитного поля возрастает быстрее, чем квадрат скорости. Отсюда следовало, что в этом случае электромагнитную массу уже нельзя рассматривать как неизменную величину; она должна зависеть от скорости движения. Это означает, что изменить направление и скорость движения быстрого электрона значительно труднее, чем движущегося с небольшой скоростью.

Дальнейшие исследования инертных свойств электрона показали, что указанная инертность зависит от направления сообщаемого ему ускорения; это незаметно при малых скоростях движения и весьма ощутимо при скоростях, близких к скорости света. Оказалось, что электрону легче сообщить боковое (поперечное) ускорение, чем ускорение в направлении его движения (продольное). Поэтому физики стали говорить о продольной и поперечной инертности (соответственно о продольной и поперечной массе электрона). В 1902 г. немецкий физик Абрагам рассчитал зависимость продольной и поперечной массы электрона от скорости его движения, предполагая сферическое распределение заряда и неизменность формы электрона. Однако экспериментальные данные не подтвердили вывода Абрагама. Проведенный несколько

¹⁾ Дж. Томсон, Электричество и материя, М., ГИЗ, 1928, стр. 21.

позже голландским физиком Г. А. Лоренцом расчет в предположении, что электрон-сфера деформируется (сплющивается в направлении движения), оказался в хорошем согласии с опытными фактами.

Экспериментальное исследование зависимости массы электронов от скорости движения было начато Дж. Дж. Томсоном, а затем продолжено Кауфманом. При этом измерялось отклонение электронов в электрическом и магнитном полях. По полученным данным определялась поперечная масса частицы. Повторенные с большей точностью, эти исследования показали, что продольная масса электрона изменяется со скоростью именно так, как предсказала формула Лоренца (несколько позже выведенная также на основе теории относительности Эйнштейном). Эта формула

имеет вид: $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$, где $\beta = \frac{u}{c}$. Все эти исследования подготовили почву, на которой Эйнштейн воздвиг в 1905 г. грандиозное здание частной теории относительности.

Увеличение массы сферы должно было привести и к увеличению ее количества движения. Согласно Томсону, это добавочное количество движения $\frac{2}{3} \frac{e^2 u}{ac^2}$ должно находиться «не в сфере, а в пространстве, окружающем сферу»¹⁾. Иными словами, Томсон наделяет импульсом само магнитное поле. В этом он идет дальше Максвелла, который также распространял понятие импульса на поле, но считал этот импульс скорее математическим понятием, аналогом механического импульса, не имеющим реального физического содержания.

Томсон считает, что электромагнитный импульс столь же реален, как и механический импульс: «Важно помнить, что это количество движения ни в коем отношении не отличается от обычного механического количества движения и может быть прибавлено или отнято от количества движения движущихся тел»²⁾. Томсон отмечает далее, что неучет количества движения поля приводит к кажущемуся нарушению третьего

¹⁾ Дж. Томсон, Электричество и материя, стр. 22.

²⁾ Там же.

закона Ньютона. Однако это противоречие тотчас же исчезает, как только мы припишем полю его собственное количество движения и будем считать, что поле и заряженные тела могут обмениваться своими импульсами: «После того, как импульс коснулся тела, в последнем появилось некоторое количество движения, в импульсе же оно уменьшилось так, что количество движения, приобретенное телом, как раз равняется количеству движения, потерянного импульсом» ¹⁾).

Классические исследования Дж. Дж. Томсона явились началом пересмотра понятия массы в той форме, как оно было сформулировано Ньютоном в его системе механики. Распространение понятия массы из области механики на область электромагнитного поля показало, что ньютоновская трактовка массы как неизменной характеристики инертных свойств вещества является ограниченной. Если в классической механике инертные свойства массы не зависели от того, движется ли тело или покоится, т. е. инертность рассматривалась независимо от скорости движения и считалась одинаковой для любых направлений силы и любых скоростей, то теперь инертность выступала в тесной связи со скоростью движения. Оказалось, что при скоростях движения, сравнимых со скоростью света, изменить скорость движущегося тела, т. е. сообщить ему ускорение, значительно труднее, чем при малых скоростях. Именно этот факт и был доказан экспериментально в опытах с движущимися электронами. Последующее развитие физической картины мира, в частности воззрений на вещество и поле, в значительной мере опиралось на результаты рассмотренных исследований.

Таким образом, мы видим, что в центре развития физики в период, последовавший после окончательного признания закона сохранения и превращения энергии, находились те теории и экспериментальные исследования, в которых понятия массы, энергии и импульса играли первостепенную роль.

¹⁾ Дж. Томсон, Электричество и материя, стр. 23.

Давление света. Опыты Лебедева. Распространение законов сохранения на электромагнитное поле. Инертная масса поля

Рассмотренные в предыдущем параграфе исследования явились важнейшей вехой на пути признания поля как качественно своеобразной формы материи. Признав это, с необходимостью нужно было прийти к мысли распространить на поле и законы сохранения. Если в отношении закона сохранения энергии это было убедительно показано Максвеллом в его теории, то для законов сохранения количества движения и момента количества движения необходимы были дальнейшие исследования.

Одним из выводов теории Максвелла явился тот, что электромагнитная световая волна должна оказывать давление на препятствие. Этот вывод был наиболее уязвимым местом теории, поскольку он был получен в предположении, что чисто механическое понятие импульса справедливо и в случае переноса его на переменное электромагнитное поле. Поэтому многие физики, отдавая должное теории Максвелла в целом, не принимали светового давления, считая это следствие теории лишь неким курьезом.

Между тем, если бы удалось экспериментально обосновать наличие светового давления, то это имело бы большое значение не только для обоснования теории электромагнетизма в целом, но и для других разделов физической науки (оптики, термодинамики излучения и др.). Поэтому были предприняты попытки найти убедительное доказательство существования светового давления. Остановимся на одной ранней попытке, принадлежащей итальянскому физiku Бартоли (1876 г.).

В своей работе, посвященной исследованию радиометрического эффекта¹⁾, Бартоли описывает следующий мысленный эксперимент: предположим, возможно осуществить как-то насос для «перекачки» электро-

¹⁾ Радиометрическим эффектом называется возникновение силы отталкивания между двумя поверхностями, находящимися в разреженном газе, если температуры поверхностей различны. Объяснение эффекта см., например, в кн.: С. Дэшман, Научные основы вакуумной техники, ИЛ, М., 1950.

магнитной энергии, не оказывающей давления, и пусть основными элементами его являются цилиндр и поршень, сделанные из идеально отражающих поверхностей. Энергия этими поверхностями не поглощается, а поршень при движении в цилиндре не испытывает сопротивления. Будем «перекачивать» электромагнитную энергию от холодного тела к горячему; тогда холодное тело будет охлаждаться еще больше, а горячее нагреваться. Но, согласно второму началу термодинамики, такой процесс может происходить только при наличии компенсирующего процесса, каковым в данном случае должна являться работа. Предполагая же отсутствие давления электромагнитного излучения, мы допускаем вместе с тем и отсутствие работы, так как при своем движении поршень не будет испытывать никакого сопротивления, и, следовательно, приходим в противоречие со вторым началом. Отсюда неизбежный вывод — электромагнитное излучение должно обладать давлением. Согласно расчету Бартоли величина этого давления должна быть равна объемной плотности электромагнитной энергии, т. е. $p = w$.

Расчет Бартоли показался некоторым физикам сомнительным. Признавая убедительность общих его рассуждений, Больцман (1884 г.) и русский физик Б. Б. Голицын (1892 г.) доказали, что в действительности, когда излучение распространяется равномерно по всем направлениям (изотропно), то независимо от отражающих способностей поверхностей давление излучения будет на все стенки одинаковым и равным

$p = \frac{1}{3} w$. Больцман на этой основе получил закон, ранее установленный экспериментально австрийским физиком Стефаном. Согласно закону Стефана—Больцмана $w \sim T^4$, где T — абсолютная температура излучающего тела. В 1893 г. Хевисайд вновь подтвердил, что $p = \frac{1}{3} w$.

Теоретический расчет Больцмана был формально безукоризнен. Но с физической точки зрения он страдал одним недостатком: понятия энтропии и абсолютной температуры, которыми пользовался Больцман, были установлены для обычных физических систем, и поэтому их перенос на электромагнитное излучение,

которое тогда еще не считалось формой материи, был никак не обоснован. В 1892 г. Голицын приписал абсолютную температуру непосредственно излучению и дал ее физическое толкование в этом случае. Из упомянутых здесь исследований, а также работ Вина, Кирхгофа и других физиков, возникла одна из важнейших физических теорий — термодинамика излучения, в которой существенную роль играет представление о световом давлении.

Таким образом, теория сказала свое слово, и теперь была очередь за экспериментом. Нужно отметить, что первые попытки опытного определения светового давления были сделаны еще в XVIII в., но, как и следовало ожидать, окончились неудачно. Поводом к постановке таких экспериментов являлось утверждение некоторых астрономов, начиная с Кеплера, что давление солнечных лучей обуславливает отклонение кометных хвостов в сторону, противоположную Солнцу. Эти опыты ставились и в XIX в., но также безрезультатно. Основная причина неудачи всех экспериментов заключалась в том, что они не смогли устранить действие побочных сил, вызванных радиометрическим эффектом и конвективными потоками остатков воздуха в приборе. Устранить эти помехи и наблюдать эффект светового давления в чистом виде удалось впервые замечательному русскому физiku П. Н. Лебедеву. Он осуществил решающий эксперимент, после которого даже скептики вынуждены были сдаться. К. А. Тимирязев вспоминал, что во время встречи с В. Томсоном последний сказал ему: «Вы знаете, я постоянно спорил с Максвеллом, но ваш москвич Лебедев заставил меня поверить в максвелловское световое давление».

Лебедев проделал огромную подготовительную работу, прежде чем в 1899 г. осуществил опытное определение светового давления на твердые тела. В основу эксперимента им была положена идея Максвелла, о которой говорилось в одном из предыдущих параграфов. Но от идеи до ее практического воплощения оказалась дистанция огромного размера. Наибольшие затруднения возникли при устранении всех упомянутых побочных факторов. Благодаря мастерству и настойчивости Лебедеву удалось преодолеть все трудности

столь необычного и тонкого эксперимента. Анализируя его результаты, Лебедев пришел к следующим выводам:

«1. Падающий пучок света производит давление как на поглощающие, так и на отражающие поверхности; эти пондеромоторные силы не связаны с уже известными вторичными конвекционными и радиометрическими силами, вызываемыми нагреванием.

2. Силы давления света прямо пропорциональны энергии падающего луча и не зависят от цвета.

3. Наблюдаемые силы давления света, в пределах погрешностей наблюдений, количественно равны максвелло-бартолиевым силам давления лучистой энергии.

Таким образом, существование максвелло-бартолиевых сил давления опытным путем установлено для лучей света»¹⁾.

Спустя десять лет Лебедев, преодолев также немалые экспериментальные трудности, доказал существование светового давления на газы. Исследования Лебедева по экспериментальному обоснованию светового давления вызвали огромный резонанс в ученом мире. Они подтвердили замечательное предвидение теории Максвелла, стимулировали дальнейшее развитие электромагнитной теории, а также способствовали (и это самое важное) утверждению взгляда на поле как на своеобразную форму материи с присущими ей атрибутами — энергией и массой.

В электромагнитной волне света энергия и масса выступают совершенно своеобразно, и это также было продемонстрировано опытами Лебедева. «С этого момента, — писал С. И. Вавилов, — свет с полным основанием стал для физика одной из форм движущейся материи, и противопоставление света и материи навсегда исчезло в этом синтезе»²⁾.

Единство энергии и массы в световом потоке непосредственно следует из факта существования светового давления. Выше мы говорили, что вектор Пойнтинга \mathbf{S} связан с плотностью w электромагнитной энергии соотношением $|\mathbf{S}| = wc$, где c — скорость света.

¹⁾ П. Н. Лебедев, Избранные сочинения, Гостехиздат, 1949, стр. 179—180.

²⁾ С. И. Вавилов, Собр. соч., т. III; стр. 11.

С другой стороны, опыты Дж. Дж. Томсона привели к заключению, что поле обладает импульсом. Пусть единица объема поля обладает импульсом g , который, очевидно, равен произведению массы поля m на скорость его распространения c , т. е. $g=mc$. Пусть световая волна в течение времени τ падает на площадку σ . Если площадка полностью поглощает всю падающую на нее электромагнитную энергию, то световая волна передаст ей импульс $g\sigma\tau$. Сила давления световой волны равна изменению импульса за единицу времени, т. е. $g\sigma$, а давление — частному от деления силы на площадь, что дает gc . Следовательно, мы получаем, что давление света на идеально поглощающую поверхность $p=gc$.

Выше мы видели, что электромагнитная теория приводила к заключению, что давление света для этого случая должно быть численно равно плотности электромагнитной энергии $p=w$. Сопоставляя оба эти выражения, получаем $w=gc$. Но так как плотность импульса $g=mc$, то отсюда заключаем, что $w=mc^2$.

Следовательно, между плотностью энергии и массой единицы объема электромагнитного поля световой волны существует прямая пропорциональная зависимость, причем коэффициентом пропорциональности служит квадрат скорости света. Это соотношение и доказывает взаимосвязь между массой и энергией в световом потоке.

Если же световой поток падает на идеально отражающую поверхность, то он производит давление в два раза большее, чем в предыдущем случае, поскольку такая поверхность получает двойной импульс — при падении и отражении; в этом случае $p=2gc=2w$. В общем же случае, если поверхность обладает коэффициентом отражения ρ , то она отражает $2\rho w$, а поглощает $(1-\rho)w$. Тогда давление равно $2\rho w + (1-\rho)w = (1+\rho)w$.

Мы видим, таким образом, что два совершенно различных подхода приводят к одному и тому же соотношению между электромагнитной массой и энергией: формула, полученная Дж. Дж. Томсоном из теоретических соображений, и формула, являющаяся следствием опытов Лебедева, отличаются лишь числовым коэффициентом. Случайно ли это совпадение

или оно отражает существующую в природе общую закономерность, связывающую массу и энергию? Ответ на этот вопрос вскоре дан был А. Эйнштейном, доказавшим универсальный характер взаимосвязи массы и энергии.

Важный шаг в направлении обобщения закона сохранения импульса был сделан французским математиком и физиком А. Пуанкаре, показавшим в своей работе «Теория Лоренца и принцип реакции» (1900 г.), что третий закон Ньютона, устанавливающий равенство действия и противодействия, не выполняется в электронной теории Лоренца. Причина этого заключалась в том, что в произвольной замкнутой области электромагнитного поля результирующая всех лоренцевых сил отлична от нуля. Расчет приводит к следующему ее значению:

$$\mathbf{F} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \int \mathbf{S} dV = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \int \mathbf{g} c^2 dV = -\frac{\partial}{\partial t} \int \mathbf{g} dV.$$

Величину $\mathbf{G}_3 = \int \mathbf{g} dV$, где \mathbf{g} — плотность импульса поля, М. Абрагам назвал в 1902 г. электромагнитным импульсом или электромагнитным количеством движения. Абрагам указал, что электромагнитный импульс, так же как и электромагнитная масса, распределен по полю с некоторой объемной плотностью.

Из теории Пуанкаре вытекал важный вывод: всякое изменение количества движения замкнутой системы, содержащей заряды и поле, посредством которого эти заряды взаимодействуют, должно сопровождаться одновременным изменением величины, зависящей от состояния поля и распределенной в нем с плотностью $\mathbf{g} = \frac{\mathbf{S}}{c^2}$. Только в этом случае будет выполняться третий закон Ньютона¹⁾. Таким образом, полный импульс системы должен быть равен сумме механического и электромагнитного импульсов, при-

¹⁾ В 1908 г. этот вопрос был специально рассмотрен А. Эйнштейном и И. Лаубом в статье «О пондеромоторных силах, действующих в электромагнитном поле на покоящиеся тела». См. в кн.: А. Эйнштейн, Собр. научных трудов, т. 1, М., 1965, стр. 126.

чем первый равен $G_m = \sum m\mathbf{u}$, а второй $G_e = \frac{1}{4\pi c} \int [\mathbf{E}\mathbf{H}] dV$, поскольку для поля в вакууме плотность электромагнитного импульса выражается через вектор Умова — Пойнтинга.

Расширенная формулировка закона сохранения импульса гласит: в замкнутой системе, содержащей вещество и электромагнитное поле, сумма механического и электромагнитного импульсов есть величина постоянная, т. е. $G_m + G_e = \text{const}$. Отсюда, между прочим, следует, что $\frac{dG_m}{dt} = -\frac{dG_e}{dt}$, и, таким образом, изменение механического импульса влечет за собой изменение импульса электромагнитного, и наоборот.

Многочисленными опытами было показано, что электромагнитное поле при вращательных движениях проявляет свойства, аналогичные тем, которые характеризуются моментом количества движения механических систем. К этой категории явлений относятся так называемые магнитомеханические эффекты и обратные им гиромагнитные явления, описанные впервые в известных опытах Эйнштейна, де Гааза и Барнетта. В 1894 г. русский физик А. И. Садовский высказал идею о том, что поляризованный по кругу свет должен обладать моментом количества движения. Это предсказание основывалось на том, что если в какой-либо точке электромагнитного поля световой волны, проходящей через анизотропный кристаллический диэлектрик, вектор напряженности поля \mathbf{E} и вектор поляризации диэлектрика \mathbf{P} не параллельны друг другу, то неизбежно должен возникать вращающий момент. Работа Садовского «Пондермоторные действия электромагнитных и световых волн», опубликованная в 1898 г., не встретила признания и сочувствия ученых. Позже, в 1909 г., величина предсказанного Садовским эффекта была рассчитана Пойнтингом. Он показал, что вращающий момент должен быть равен $S/2\pi\nu$, где S — плотность потока электромагнитной энергии, ν — частота волны (расчет производился для единичной площадки, расположенной перпендикулярно волне).

Масса электромагнитного поля и ее экспериментальное подтверждение

Опыты Лебедева убедительно показали, что электромагнитное поле обладает инертной массой. Это был очень важный шаг на пути признания поля как формы материи, как объективной реальности. В установлении этого факта, подчеркнем еще раз, большую роль сыграли законы сохранения.

Но материальные объекты характеризуются не только инертной, а также и гравитационной («тяжелой») массой. Поэтому следовало ожидать, что электромагнитное поле должно испытывать действие и гравитационных сил.

Согласно важнейшему принципу общей теории относительности — принципу эквивалентности гравитационной и инертной масс — обе эти массы равны, и поэтому любой материальный объект должен проявлять как инертные, так и гравитационные свойства. Поэтому электромагнитное поле, являясь формой материи, должно было также обладать, помимо инертных, еще и гравитационными свойствами. Наличие последних, как было показано А. Эйнштейном в 1916 г., приводит к эффекту искривления светового луча в гравитационных полях с большой напряженностью. В частности, Эйнштейн предсказал величину эффекта искривления при прохождении светового луча вблизи Солнца. Луч света от звезды, проходящий вблизи Солнца, должен притягиваться последним и вследствие этого его траектория должна казаться несколько вогнутой относительно Солнца. Величина этого отклонения выражается формулой

$$\alpha = \frac{4\gamma M}{c^2 R},$$

где γ — гравитационная постоянная, c — скорость света, M — масса Солнца, R — его радиус.

Наблюдать предсказанный Эйнштейном эффект можно только в период полных солнечных затмений, так как все остальное время яркое Солнце не позволяет рассмотреть находящиеся вблизи него звезды.

По инициативе английского астрофизика А. Эддингтона были организованы две экспедиции с целью

наблюдения полного солнечного затмения 29 мая 1919 г. Одна из них направилась на западное побережье Африки, вторая — в северную часть Бразилии. Во время наблюдений было получено большое количество фотографий звезд, находящихся вблизи Солнца. Предсказанное Эйнштейном кажущееся угловое смещение звезды, вычисленное по приведенной выше формуле, должно иметь величину в $1,75''$. Результаты наблюдений дали следующие значения: первая экспедиция — $1,61'' \pm 0,45''$, вторая экспедиция — $1,98'' \pm 0,18''$ (величина отклонения измерялась по краю Солнца, т. е. при $R=1$). Таким образом, обе величины хорошо согласовывались с теоретической. Это было величайшим триумфом теории относительности и вместе с тем триумфом материалистических концепций трактовки электромагнитного поля.

До последних лет попытки обнаружения релятивистских эффектов при действии гравитационного поля Земли на электромагнитное поле не делались. Поскольку сила тяжести на Земле в 3000 раз меньше этой величины на Солнце, то наблюдение подобных эффектов в земных условиях было делом безнадежным. Такая возможность появилась только в 1958 г. после открытия немецким физиком Р. Мёссбауэром явления резонансного поглощения без отдачи гамма-квантов¹⁾. Сущность эффекта Мёссбауэра заключается в следующем. Переход ядер некоторых радиоактивных элементов из возбужденного состояния в нормальное сопровождается излучением гамма-квантов (фотонов) с определенной, характерной для данного ядра частотой. Невозбужденные ядра способны поглощать фотоны, частота которых совпадает с частотой тех фотонов, которые могли бы излучить данные ядра. Это явление называется резонансным захватом (поглощением) фотонов. Однако в обычных условиях фотоны, испускаемые ядрами атомов, не могут испытывать резонансное поглощение.

Это является следствием того, что ядро, испуская фотон, испытывает отдачу, приходит в движение и

¹⁾ Историю и различные применения эффекта Мёссбауэра см., например, в кн.: Г. Фрауэнфельдер, Эффект Мёссбауэра, Атомиздат, М., 1964.

уносит некоторую энергию из той, которую должен был бы унести с собой испущенный им гамма-квант. Потеря энергии, естественно, приводит к уменьшению частоты кванта и, следовательно, к нарушению условия резонансного поглощения.

Мёссбауэру удалось устранить потери энергии квантами при их испускании и поглощении и тем самым сделать процесс резонансного поглощения непосредственно наблюдаемым. Для этого Мёссбауэр ввел излучающие и поглощающие ядра в кристаллическую решетку другого элемента, так что отдачу при испускании фотона теперь испытывало не само ядро, а весь кристалл в целом. Так как масса кристалла чрезвычайно велика по сравнению с массой отдельного ядра, то в результате процесс испускания фотонов ядром практически идет без потерь энергии гамма-квантом, и его частота остается неизменной. Поток гамма-квантов от радиоактивного источника направляется на тонкую пластинку (мишень), содержащую ядра того же элемента, что и источник. За мишенью помещается детектор, регистрирующий интенсивность потока квантов, прошедших через мишень.

При неподвижных источнике и мишени на детектор попадает минимальное количество гамма-квантов, так как большинство их поглощается благодаря резонансному захвату. Если же источник или мишень перемещаются относительно друг друга с некоторой скоростью v , то резонансный захват уже не имеет места и интенсивность потока квантов, проходящих через мишень, резко возрастает.

Причиной «расстройки» явления является эффект Доплера, который, как известно, заключается в зависимости частоты излучения от скорости движения источника. В обычных условиях эффект Доплера мало сказывается на частоте световых волн, так как скорость источника много меньше скорости света. В опытах же Мёссбауэра достаточно было перемещения источника со скоростью порядка сотых долей $см/сек$, чтобы можно было заметить резкое уменьшение резонансного захвата гамма-квантов. Метод оказался настолько чувствительным, что позволял фиксировать относительное изменение частоты фотонов на величину порядка 10^{-16} .

С помощью эффекта Мёссбауэра и удалось в земных условиях доказать наличие у фотонов гравитационной массы.

Указанное действие гравитационного поля на свет должно проявиться в изменении частоты световой волны. Действительно, в соответствии с квантовой теорией энергия фотона равна $\epsilon = h\nu$. Согласно закону взаимосвязи массы и энергии $\epsilon = mc^2$, где c — скорость света. Сопоставляя оба эти выражения, получаем

$$h\nu = mc^2,$$

откуда масса фотона равна $m = \frac{h\nu}{c^2}$.

Если потенциал гравитационного поля равен Φ , то потенциальная энергия частицы с массой m равна $m\Phi$. Следовательно, фотон будет обладать потенциальной энергией $\frac{h\nu}{c^2}\Phi$. Таким образом, полная энергия фотона в гравитационном поле будет складываться из его собственной энергии $h\nu$ и гравитационной $\frac{h\nu}{c^2}\Phi$.

При движении материальных объектов в гравитационном поле их полная энергия должна сохраняться (в отсутствие сопротивляющейся среды). В вакууме полная энергия фотона не должна изменяться. Отсюда следует, что при движении фотона к тяготеющей массе его потенциальная энергия убывает и соответственно возрастает собственная электромагнитная энергия, которая пропорциональна частоте. В результате должно произойти изменение частоты света — ее сдвиг в сторону фиолетовой части спектра. При обратном движении фотона от тяготеющей массы возрастает его потенциальная и уменьшается электромагнитная энергия и смещение частоты света произойдет в сторону красной части спектра. Был сделан ряд попыток экспериментально доказать путем наблюдения над солнечными линиями спектра, что такое «покраснение» действительно существует¹⁾). Безупречного подтверждения этого факта астрофизики не

¹⁾ См. по этому поводу, например, кн.: С. И. Вавилов, Экспериментальные основания теории относительности, Собр. соч., т. IV, М., 1956.

получили, так как для этой цели необходимо было бы отыскать во вселенной место с потенциалом тяготения, значительно бóльшим, чем на Солнце, поскольку ожидаемый эффект был весьма мал. Так, в случае Солнца «покраснение» фотонов (сдвиг длины волны спектральных линий) $\Delta\lambda$ должен был составить всего лишь $2,1 \cdot 10^{-6} \lambda_0$, где λ_0 — несмещенная длина волны линии.

В случае движения фотонов в гравитационном поле Земли изменение их потенциальной энергии равно gH , где H — разность высот, и изменение частоты фотонов

$\Delta\nu = \pm \frac{gH}{c^2} \nu_0$, где минус соответствует движению

луча вверх, а плюс — движению луча вниз. Если луч проходит расстояние по вертикали в 1 мм, то ожидаемый эффект изменения частоты, если несмещенная частота порядка 1 гц, составит по порядку 10^{-16} — как раз в пределах чувствительности эффекта Мёссбауэра. В 1960 г. американский физик Р. Паунд произвел подобный эксперимент¹⁾. При разности высот источника и приемника гамма-лучей 21 м ожидаемый эффект действия гравитационного поля на частоту фотонов составил величину порядка $2,3 \cdot 10^{-15}$.

Таким образом, рассмотренные выше опыты с полной убедительностью показали, что электромагнитное поле, как и вещество, обладает как инертной, так и гравитационной массой. Поле перемещается в пространстве и оказывает давление на препятствия; следовательно, оно обладает массой, импульсом и энергией. Экспериментальное подтверждение выводов теории относительно свойств электромагнитного поля сыграло большую роль в формировании материалистических взглядов на вещество и поле как на две качественно различные формы материи. Одновременно было доказано, что все процессы, происходящие в поле, подчиняются тем же законам сохранения, что и вещество, а именно: закону сохранения и превращения энергии, закону сохранения количества движения и закону сохранения момента количества движения.

Указанное обстоятельство сыграло большую роль в выяснении многих тонкостей механизма испускания

¹⁾ Р. Паунд, О весе фотонов, УФН, т. 72, в. 4, 1960.

световых квантов атомами. Н. Бор впервые постулировал связь энергии светового кванта с изменением энергии электрона при его переходе с одной стационарной орбиты атома на другую. При дальнейшем развитии квантовой механики эта идея Бора была обобщена в понятии квантового перехода — самопроизвольного перехода квантовой системы из одного дискретного состояния в другое. Было установлено, что одни переходы происходят с большей вероятностью, другие с меньшей, и эта особенность квантовых переходов оказалась тесно связанной с законами сохранения. Именно, были сформулированы так называемые правила отбора как некоторые дополнительные ограничения, определяющие допустимые переходы, каждому из которых был сопоставлен определенный закон сохранения: энергии, количества движения, момента количества движения, а в дальнейшем и другие законы сохранения, специфические для физики микромира (см. часть II). Таким образом, те переходы, которые не подчинялись этим законам, исключались.

Все сказанное выше о взаимосвязи вещества и поля убедительно показало, что обе эти формы материи превращаются друг в друга, и это превращение происходит в строгом соответствии с законами сохранения¹⁾.

Весьма важными оказались методологические и философские последствия теоретических и экспериментальных исследований свойств электромагнитного поля. Они показали ограниченность механистических концепций в физике, разрушили мнение об универсальном значении законов Ньютона и основных механических представлений. Но отказ от механицизма в области электромагнитной теории, которая явно не укладывалась в рамки механистического миропонимания, не означает отказа от материалистического воззрения на физические явления и процессы. Напротив, дальнейшее развитие физики показало, что только в рамках диалектического материализма можно было понять те специфические процессы и управляемые ими законы, которые были открыты физиками в области микромира.

¹⁾ Подробное изложение обоснования материалистического взгляда на поле см. в кн.: О. Б. Брон, Электромагнитное поле как вид материи, Госэнергоиздат, 1962.

Если некоторые ученые делали попытки как-то отстоять механистическое мировоззрение от посягательства новых концепций, пытаясь истолковать вновь открытые факты в духе этого мировоззрения, то вскоре и они поняли всю тщетность своих надежд. Оставалось совсем немного времени до того часа, когда квантовая механика и теория относительности нанесли механицизму решающий удар, после чего ограниченность классических теорий стала уже очевидна всем.

В этой крутой ломке старых представлений все больше и больше выявлялось непреходящее значение законов сохранения. Они расширяли свое содержание, становясь все более и более общими. Физикам становилось ясно, что законы сохранения действительно выражают наиболее общие, фундаментальные свойства материи, специфику движения каждой ее формы, а также сохранение ее важнейших свойств.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

Законы сохранения в современной физике

ГЛАВА I

Законы сохранения в теории относительности

Общие замечания

Начало XX в. ознаменовалось созданием квантовой теории и теории относительности — двух фундаментальных теорий, предопределивших развитие физики в последующие десятилетия. Остановливаясь на роли теории относительности в развитии идеи сохранения, необходимо сделать несколько общих замечаний.

В классической механике Ньютона пространство являлось лишь некимместилищем материи. Теория относительности показала, что пространство и время должны рассматриваться в неразрывном единстве друг с другом и зависеть от свойств материальных объектов. Фундаментальные свойства симметрии пространства и времени — их однородность и изотропность — нашли в теории относительности значительно более полное выражение, чем это было в классической механике. Важнейший факт теории относительности — равноправность всех инерциальных систем отсчета — явился непосредственным следствием однородности и изотропности четырехмерного пространства-времени.

Создание теории относительности было подготовлено всем предшествующим развитием физической науки. Уже в 80—90-х гг. прошлого века рядом опытов была показана недостаточность классической механики и электродинамики для объяснения некоторых фактов и явлений. Однако непосредственный толчок,

побудивший некоторых физиков задуматься о смысле привычных понятий, был дан классическим экспериментом Майкельсона и Морли (1881 г.). Как известно, этот эксперимент ставил своей целью доказать существование «эфирного ветра»¹⁾. Его отрицательный результат сыграл очень важную роль в пересмотре привычных концепций пространства и времени.

К отрицательному результату привели и другие попытки обнаружить «эфирный ветер». Отсюда следовало, что «эфирного ветра» не существует и что, следовательно, движение Земли не влияет на протекание оптических и электродинамических явлений. То-есть показано, что протекание любых физических процессов не должно зависеть от системы отсчета, движущейся равномерно и прямолинейно в пространстве.

Пытаясь объяснить этот результат экспериментов, связанных с проблемой эфира, многие ученые высказали ряд интересных и оригинальных мыслей. Г. Лоренц, А. Пуанкаре и некоторые другие ученые довольно близко подошли к правильной интерпретации указанного выше факта. Окончательное решение проблемы было дано в классической работе А. Эйнштейна, опубликованной в сентябре 1905 г.

Работа Эйнштейна «К электродинамике движущихся тел» начиналась словами: «Известно, что электродинамика Масквелла в том виде, как ее в настоящее время обыкновенно понимают, в применении к движущимся телам приводит к асимметрии, которая, по-видимому, не свойственна самим явлениям. Вспомним, например, электродинамическое взаимодействие между магнитом и проводником. Примеры подобного рода, как и неудавшиеся попытки обнаружить движение Земли относительно «светоносной среды», ведут к предположению, что не только в механике, но и в электродинамике никакие свойства явлений не соответствуют понятию абсолютного покоя, и даже, более того, к предположению, что для всех координатных систем, для которых справедливы уравнения механики, имеют место те же самые электродинамические и

¹⁾ См. литературу по теории относительности, указанную на стр. 155 и 158.

оптические законы... Мы намерены это предположение (содержание которого в дальнейшем будет называться «принципом относительности») превратить в предпосылку и сделать, кроме того, добавочное допущение, находящееся с первым лишь в кажущемся противоречии, именно, что свет в пустоте всегда распространяется с определенной скоростью, не зависящей от состояния движения излучающего тела. Эти две предпосылки достаточны для того, чтобы, положив в основу теорию Масквелла для покоящихся тел, построить простую, свободную от противоречий электродинамику движущихся тел. Введение «светоносного эфира» окажется при этом излишним, поскольку в предлагаемой теории не вводится «абсолютно покоящееся пространство», наделенное особыми свойствами, а также ни одной точке пустого пространства, в которой протекают электромагнитные процессы, не приписывается какой-нибудь вектор скорости»¹⁾.

Таким образом, основные положения теории относительности (в той ее части, которая позже получила наименование специального принципа относительности, в отличие от общей теории — теории тяготения, основы которой были заложены Эйнштейном позже, в 1916 г.) сводились к двум постулатам: 1) скорость света во всех инерциальных системах отсчета одинакова (постулат постоянства скорости света) и 2) никакими опытами невозможно выделить какую-либо преимущественную инерциальную систему отсчета. Иначе говоря, законы физики должны быть инвариантны относительно любой инерциальной системы отсчета (постулат относительности)²⁾.

В развитии общей идеи сохранения в физике второй постулат сыграл очень большую роль. Именно в нем идея сохранения величин была обобщена до идеи сохранения законов. Действительно, инвариантность означает неизменность относительно какого-либо преобразования. В классической механике законы Ньютона не изменяют своего вида относительно

¹⁾ А. Эйнштейн, К электродинамике движущихся тел. В сб. «Принцип относительности», ГТТИ, 1935, стр. 133—134.

²⁾ Краткое изложение основ теории относительности см., например, в кн.: Ю. Румер и М. Рывкин, Теория относительности, Учпедгиз, 1960.

преобразований Галилея. Требование инвариантности в этом случае, как известно, составляет содержание классического принципа относительности. Эйнштейн же пошел дальше (в этом его величайшая заслуга) и постулировал требование инвариантности (т. е. неизменяемости) формы законов природы при переходе от одной инерциальной системы к другой. В частности, все уравнения специальной теории относительности являются инвариантными по отношению к преобразованиям Лоренца.

Эйнштейн показал, что из основных постулатов теории относительности следует изменение временных и пространственных масштабов. Этот факт нашел свое конкретное выражение в формулах, дающих зависимость длины и времени от скорости движения системы. Теория относительности устранила гипотезу об эфире, поскольку не имело никакого смысла говорить о покое или движении относительно эфира: никакие опыты принципиально не могли обнаружить это движение.

Являясь обобщением классической механики Галилея — Ньютона, теория относительности, естественно, обобщила на область скоростей, сравнимых со скоростью света, не только законы движения тел, но и основные динамические понятия.

Что касается общей теории относительности, являющейся по существу теорией тяготения, рассматривающей гравитационные процессы при больших величинах потенциала тяготения, то в предыдущих параграфах мы рассмотрели некоторые ее следствия в связи с законами сохранения и развитием материалистических концепций о поле.

В теории относительности подверглись коренным изменениям фундаментальные понятия и представления классической механики — покой и движение, время и скорость — все то, что характеризует пространственно-временные отношения между телами, а также такие понятия, как масса, импульс и т. п. Вместе с этим претерпела изменение и точка зрения физиков на характер протекания физических процессов в движущихся системах. Естественно, все это не могло не сказаться на судьбе законов сохранения. Действительно, они не только приобрели гораздо более общую форму, но и оказались взаимосвязанными,

Масса, импульс и энергия в теории относительности. Вопрос о двух мерах движения

Рассмотренные в последней главе первой части исследования, которые привели к распространению механических понятий энергии и импульса на электромагнитное поле, в значительной степени подготовили почву для дальнейшего обобщения этих понятий в теории относительности. Введение понятий электромагнитной массы, плотности электромагнитного импульса и ряда других оказалось чрезвычайно плодотворным. Уже в это время было обращено внимание, например, на тот факт, что вектор Умова — Пойнтинга, помимо своего энергетического значения, имеет еще и смысл плотности импульса, что указывало на какую-то скрытую связь между законами сохранения энергии и импульса.

Важнейшим выводом теории относительности является утверждение о тесной взаимосвязи между пространством и временем. Эта взаимосвязь была чужда классической физике: время и пространство, две формы бытия материи, существовали совершенно независимо друг от друга. Указанная взаимосвязь повлекла за собой объединение в единый комплекс разнородных величин, казавшихся с точки зрения классической физики совершенно независимыми. В частности, были объединены понятия энергии и импульса.

Мы уже упоминали о том, что важнейшими формулами теории относительности являются преобразования Лоренца, полученные им незадолго перед появлением первой работы Эйнштейна. Они выражают взаимосвязь между пространственными координатами и длительностью некоторого события в двух системах, движущихся равномерно и прямолинейно относительно друг друга. Приведем эти формулы, поскольку они нам понадобятся в дальнейшем. Если x, y, z и t — координаты и время некоторого события в одной системе отсчета и соответственно x', y', z', t' — в другой, то

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - \frac{\beta x}{c}}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Здесь v — скорость движения системы, c — скорость света, $\beta = v/c$. Из формул преобразования Лоренца вытекает закон сложения скоростей, который имеет вид

$$u' = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}}.$$

Весьма плодотворной в теории относительности явилась идея математика Г. Минковского рассматривать пространственные координаты x , y , z и время t как координаты точки в некотором четырехмерном пространстве, названном позже «четырёхмерным миром» Минковского. В таком «мире» любое событие описывается путем введения четырех чисел («координат») x_1, x_2, x_3, x_4 , из которых три первых выражают пространственные, а четвертое — временную координату; последняя равна ict , где i — мнимая единица. В четырехмерном мире нашла свое математическое выражение основная идея теории относительности о взаимосвязи пространства и времени. Следует подчеркнуть, что эта взаимосвязь, однако, не означает сведения пространства к времени или наоборот. Качественная разница между этими понятиями всегда сохраняется, на что, в частности, указывает и тот факт, что временная координата представляется мнимым выражением, тогда как пространственные координаты — действительные числа. Объединение пространства и времени в единый четырехмерный комплекс можно было бы формально провести и в классической механике. Но в ней такое объединение никакой роли не играло бы, так как не соответствовало бы никакой физической идее.

Выше уже говорилось о том, что релятивистское обобщение классической механики неизбежно привело и к обобщению основных динамических законов и понятий, в том числе тех, которые связаны с законами сохранения. В частности, формулы импульса и кинетической энергии в их классической форме оказались неприменимыми в теории относительности, так как не удовлетворяли требованию инвариантности¹⁾. Выпол-

¹⁾ См., например, А. И. Жуков, Введение в теорию относительности, Физматгиз, М., 1961, стр. 95.

нение, например, закона сохранения количества движения в одной системе еще не означало его выполнения в другой. Что это имеет место в действительности, можно показать несложным расчетом¹⁾. Поэтому, естественно, необходимо было найти такие обобщенные выражения сохраняющихся величин, которые удовлетворяли бы требованиям теории относительности.

Вычисления приводят к следующей формуле для релятивистского импульса:

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

где m_0 — масса покоя тела, $\beta = v/c$. Именно при таком выражении релятивистского импульса закон сохранения количества движения выполняется во всех инерциальных системах отсчета. Нетрудно видеть, что при малых скоростях движения формула релятивистского импульса переходит в формулу импульса классической механики и соответственно закон сохранения релятивистского импульса переходит в обычный закон сохранения импульса.

Что нового внесла теория относительности в понятие массы? Классическую трактовку этого понятия мы рассмотрели выше. Там масса рассматривалась как абсолютно неизменная постоянная характеристика инертных и гравитационных свойств материи как в форме вещества, так и в форме поля. Однако уже в конце прошлого века были открыты явления, объяснение которых нельзя было получить в рамках классических концепций.

Уже отмечалось, что исследования свойств движущихся электронов Дж. Томсоном, Лоренцом и Абрагамом привели к выводу, что масса электрона должна зависеть от скорости его движения. Попытки истолковать отрицательный результат опыта Майкельсона и Морли привела Лоренца к гипотезе «деформированного электрона». Лоренц вычислил так называемые продольную и поперечную электромагнитную

¹⁾ См., например, А. И. Жуков, Введение в теорию относительности, Физматгиз, М., 1961, стр. 97.

массу электронов и получил для них соответственно следующие выражения:

$$m_{\text{пр}} = \frac{m_0}{\sqrt{(1-\beta^2)^3}}, \quad m_{\text{поп}} = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Экспериментальные исследования полностью подтвердили факт зависимости массы электрона от скорости его движения. Впервые эта зависимость была обнаружена и изучена в опытах немецкого физика В. Кауфмана в период 1899—1906 гг. Кауфман измерял отклонение β -лучей радия (представляющих, как известно, поток электронов) в магнитном и электрическом полях. При этом он обнаружил, что величина удельного заряда электрона, т. е. отношение его заряда к массе, при увеличении скорости электронов уменьшается. Так как заряд электрона изменяться не мог, то, естественно, напрашивался вывод, что масса электрона с возрастанием его скорости увеличивается¹⁾. После Кауфмана зависимость массы электрона от скорости экспериментально изучали многие физики (Бухерер, Шефер, Нейман и др.); они полностью подтвердили факт наличия этой зависимости.

В теории относительности было показано, что зависимость массы от скорости движения материальных объектов является универсальным законом и что формула

формула $m = m_0 / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ имеет общее значение. В этой формуле m — масса тела, движущегося со скоростью v , m_0 — масса того же тела, находящегося в относительном покое. Легко видеть, что при скоростях движения, много меньших скорости света, $v \ll c$, зависимость массы от скорости практически необнаружима.

Приведенная формула низводит массу от абсолютной величины, каковой она была в классической механике, до величины относительной. Действительно, так как скорость тела различна в разных системах отсчета, то и масса соответственно должна быть величиной относительной, различной в разных системах отсчета. Инвариантной величиной оказывается только масса покоя m_0 .

¹⁾ W. Kaufmann, Über der Konstitution des Electrons, Ann. Physik, Bd. 19, 1903.

Что касается физического смысла зависимости массы от скорости, то он состоит в том, что изменить скорость материального объекта, т. е. сообщить ему ускорение, гораздо легче при малых скоростях движения, чем при больших. Иными словами, чем больше скорость движения материального объекта, тем больше он сопротивляется изменению скорости, т. е. тем больше его инертность.

С учетом зависимости массы от скорости основной закон динамики (второй закон Ньютона) приобретает вид

$$F = \frac{d}{dt} \left(\frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right).$$

Это уравнение является инвариантным по отношению к преобразованиям Лоренца и, следовательно, удовлетворяет требованиям теории относительности (разумеется, при условии, что и сила F подчинена определенным правилам преобразования). Из приведенного уравнения следует, что причина недостижимости скорости света заключается в том, что по мере приближения к ней скорости тела масса тела неограниченно возрастает. Поэтому понадобилась бы бесконечно большая сила, чтобы сообщить телу дальнейшее ускорение.

Рассмотрим вопрос об энергии в теории относительности. Выражение для кинетической энергии получается из второго закона Ньютона. Используя релятивистское обобщение этого закона, можно получить и соответствующее ему релятивистское выражение кинетической энергии:

$$E_k = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right).$$

Принимая во внимание зависимость массы от скорости, последнее выражение можно записать в таком виде: $E_k = mc^2 - m_0 c^2$. Разность $m - m_0$ иногда называют кинетической массой, так как именно она соответствует кинетической энергии тела. Произведение mc^2 называется полной энергией, а $m_0 c^2$ — энергией покоя тела. В следующем параграфе мы специально обсудим это соотношение.

При малых скоростях движения ($\beta \ll 1$) формула релятивистской кинетической энергии переходит в известную формулу классической механики. Действительно, при малых β имеем

$$(1 - \beta^2)^{-1/2} \approx 1 + \frac{1}{2} \beta^2.$$

Следовательно,

$$E_k = m_0 c^2 \frac{\beta^2}{2} = \frac{1}{2} m_0 v^2.$$

В теории относительности получил свое решение и вопрос о двух мерах механического движения, возникший еще на заре становления физики как науки. Теория относительности, вскрыв глубокие связи между свойствами пространства и времени, показала, что поскольку материя движется в них, то мера ее движения должна быть также тесно связана с их свойствами. В следующей главе мы вернемся к этому вопросу, а сейчас отметим лишь следующее. В классической механике поступательное движение имеет две меры механического движения: векторную — импульс (количество движения) и скалярную — кинетическую энергию. Важно, что, допустив существование скалярной меры, с необходимостью следует признать существование и векторной меры.

Следует указать, что двоякой мерой обладает не только механическое движение. Выше мы убедились в том, что полю, точно так же как и веществу, присущи энергия и импульс, т. е. оно также обладает двоякой мерой движения. Обе меры движения — импульс и энергия — универсальны.

В классической механике импульс $p = mv$ и энергия $E = \frac{mv^2}{2}$ связаны формально равенством $p^2 = 2mE$. Однако в ней пространство и время независимы. В теории относительности же пространство и время взаимосвязаны. Они выступают как органическое целое в форме «четырехмерного мира». В этом «мире» координаты некоторого события рассматриваются как компоненты четырехмерного вектора. При переходе от одной инерциальной системы к другой эти компоненты преобразуются согласно формулам преобразования Лоренца,

Точно так же импульс выступает в теории относительности как четырехмерный вектор \mathbf{p} , объединяющий как векторную, так и скалярную меры движения в единый тензор¹⁾ энергии-импульса. Компонентами его векторной (пространственной) части являются компоненты импульса в релятивистской форме, а скалярная (временная) компонента связана с энергией:

$$p_1 = \frac{m_0 v_1}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad p_2 = \frac{m_0 v_2}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad p_3 = \frac{m_0 v_3}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

$$p_4 = \frac{i m_0 c}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Скалярная компонента p_4 выражается через энергию следующим образом:

$$p_4 = \frac{i m_0 c}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{i}{c} \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{i}{c} E_0.$$

Связь между полной энергией и импульсом в теории относительности можно получить из выражения для релятивистской массы:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Представим это выражение в виде $m^2 c^4 - m^2 v^2 = m_0^2 c^4$. Так как импульс тела равен $p = mv$, то $m^2 c^4 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$, откуда получаем искомую зависимость:

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}.$$

Еще одна зависимость между полной энергией и импульсом получается, если поделить выражение для энергии на выражение для импульса, что дает

$$E = \frac{pc^2}{v}.$$

¹⁾ Тензором называется величина, компоненты которой определенным образом преобразуются вместе с преобразованием системы координат. Компоненты тензора в новой системе линейно и однородно выражаются через его компоненты в старой системе координат.

Сопоставим сохраняющиеся величины в классической механике и в теории относительности:

Наименование величины	Теория относительности	Классическая механика
Масса m	$\frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$	m_0
Энергия E	$\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$	$\frac{m_0 v^2}{2}$
Импульс p	$\frac{m_0 v}{\sqrt{1-\beta^2}}$	$m_0 v$
Соотношение между p и E	$E = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}$	$E = \frac{p^2}{2m_0}$

Проследив развитие идеи сохранения в теории относительности, мы видим, что в этой теории сохраняющиеся величины и соответствующие им законы получили более глубокое обоснование. Теория относительности установила новые связи между ними, не имевшие места в рамках классической механики. Как видно из таблицы, классические выражения сохраняющихся величин являются предельным случаем релятивистских выражений, когда скорость движения тела много меньше скорости света ($v \ll c$).

Законы сохранения в теории относительности. Закон взаимосвязи массы и энергии

Изменение содержания понятия массы привело и к расширению классического закона сохранения массы. Поскольку в классической физике считалось само собой разумеющимся, что масса системы равна сумме масс ее составных частей, то одной из формулировок закона сохранения массы являлось утверждение, что при любых изменениях системы тел или частиц масса этой системы остается неизменной. Со времен Ломоносова и Лавуазье этот факт считался прочно обоснованным экспериментально и не вызывал сомнений. Фундаментом классического закона сохранения массы являлась ньютоновская концепция инертной массы как неизменной характеристики вещества.

Однако теория относительности ввела существенный корректив в трактовку понятия массы, показав, что инертная масса при больших скоростях движения тел. существенно зависит от скорости движения. Это означает, что в релятивистской области закон сохранения инертной массы в той форме, как он трактовался в классической физике, не будет выполняться. Релятивистская трактовка закона сохранения массы оказалась тесно связанной с релятивистской трактовкой энергии как сохраняющейся величины.

Выше было показано, что обобщение понятий энергии и импульса на электромагнитное поле привело к заключению, что электромагнитная масса и энергия выступают в неразрывной связи. Теоретические исследования Дж. Дж. Томсона в области электронной теории и опыты П. Н. Лебедева по определению светового давления привели к одной и той же количественной зависимости между электромагнитной массой и энергией. Отличие между ними состояло лишь в числовых коэффициентах. В более общем виде указанная взаимосвязь проявилась в формуле А. Пуанкаре, выражающей зависимость между плотностью электромагнитного импульса \mathbf{g} и плотностью потока электромагнитной энергии \mathbf{S} , а именно $\mathbf{g} = \mathbf{S}/c^2$.

Указание на тот факт, что взаимосвязь между массой и энергией выходит за рамки электромагнитного поля, было получено в теоретических исследованиях немецкого физика Хазенорля¹⁾, а также несколько позже в работах Мозенгейля²⁾ и М. Планка³⁾, исследовавших излучение движущейся полости. Они показали, что между массой покоя и энергией существует соотношение, аналогичное тому, которое вытекает из опытов Лебедева.

В связи с этим небезынтересно отметить, что в фашистской Германии, где пытались начисто зачеркнуть заслуги Эйнштейна в области физики, открытие закона

¹⁾ F. Hasenöhrli, Zur Theorie der Strahlung in bewegten Körper, Ann. d. Physik, v. 17, S. 344, 1904.

²⁾ K. von Mosengeil, Theorie der Stationären Strahlung in einem gleichförmig bewegten Hohlraum, Ann. d. Physik, v. 22, S. 467, 1907.

³⁾ M. Planck, Zur Dynamik bewegten Systeme, Ann. d. Physik, v. 26, S. 1, 1907.

взаимосвязи между массой и энергией фашиствующие физики, как, например, Ленард, приписывали Хазенорлю. М. Лауэ писал по этому поводу: «И здесь мы прежде всего должны опровергнуть первый образец национал-социалистического подлога в истории — в данном случае в области физики. В связи с работой Фрица Хазенорля... Филипп Ленард и его ближайшие друзья пытались в эпоху «третьей империи» приписывать закон инерции (так Лауэ называет закон взаимосвязи массы и энергии. — Я. Г.), 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»¹⁾.

В сентябре 1905 г. Эйнштейн опубликовал небольшую заметку под названием «Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии», в которой впервые был сформулирован закон взаимосвязи массы и энергии: «Если тело отдает энергию L в виде излучения, то его масса уменьшается на L/c^2 . При этом, очевидно, не существенно, что энергия, взятая у тела, прямо переходит в энергию излучения, так что мы приходим к более общему выводу.

Масса тела есть мера содержащейся в нем энергии: если энергия изменяется на величину L , то масса изменяется соответственно на величину $\frac{L}{9 \cdot 10^{20}}$, причем здесь энергия измеряется в эргах, а масса — в граммах»²⁾.

В последующие годы к закону взаимосвязи массы и энергии Эйнштейн возвращался неоднократно. Так, в 1906 г. в работе «Закон сохранения движения центра тяжести и инерция энергии»³⁾ обосновывается утверждение, что закон взаимосвязи $E = mc^2$ является

¹⁾ М. Лауэ, Инерция и энергия, УФН, т. 67, в. 4, стр. 735.

²⁾ А. Эйнштейн, Собр. научных трудов, Изд-во «Наука», т. I, М., 1965, стр. 38.

³⁾ Там же, стр. 39.

необходимым и достаточным условием того, чтобы выполнялся, по крайней мере в первом приближении, закон сохранения движения центра тяжести системы, в которой, кроме механических, происходят также и электромагнитные процессы.

Весьма обстоятельно закон взаимосвязи массы и энергии был рассмотрен Эйнштейном в статье «Об инерции энергии, требуемой принципом относительности» (1907 г.), в которой показано, что этот закон следует рассматривать как закон «исключительной общности»¹⁾.

Выше (см. стр. 161) было показано, что релятивистская кинетическая энергия выражается формулой

$$E_k = mc^2 - m_0c^2,$$

где m_0c^2 — энергия покоя. Таким образом, с релятивистской кинетической энергией связана масса $\Delta m = = E_k/c^2$.

Из закона взаимосвязи массы и энергии $E = mc^2$ следует, что масса покоя является мерой внутренней энергии покояющегося тела (под внутренней энергией понимается не только энергия молекулярного движения, но и внутриядерная и другие формы энергии).

Важным следствием закона Эйнштейна явилось признание того факта, что любые изменения энергии системы неизбежно связаны с изменением ее массы. Рассмотрим этот вопрос несколько подробнее.

Как известно, закон сохранения энергии в классической физике утверждает, что энергия замкнутой системы есть постоянная величина. При этом полная энергия складывается из суммы энергий тел или частиц, образующих систему, и из энергии их взаимодействия. Таким образом, $E = \sum_i E_i + E_{св}$, где E — полная энергия, $\sum_i E_i$ — энергия составных частей системы, $E_{св}$ — энергия их взаимодействия (связи). Последняя может быть как положительной, так и отрицательной. Таким образом, энергия системы может быть как больше, так и меньше энергии составляющих ее частей и,

¹⁾ А. Эйнштейн, Собр. научных трудов, Изд-во «Наука», т. I, М., 1965, стр. 53.

следовательно, сам закон сохранения энергии уже нельзя формулировать как утверждение о сохранении суммы энергий частей, составляющих изолированную систему.

Например, если система состоит из частей, между которыми действуют силы отталкивания, то при распаде такой системы на отдельные части уменьшится энергия всей системы, которая будет израсходована на работу разрушения системы. Если же система состоит из частей, между которыми действуют силы притяжения, то для дробления ее на отдельные части необходимо, чтобы внешние силы совершили работу. Эта работа пойдет на увеличение энергии системы.

Разделим обе части равенства $E = \sum_i E_i + E_{св}$ на c^2 . Тогда, согласно формуле Эйнштейна, получим $m = \sum_i m_i + E_{св}/c^2$, где m — масса всей системы, $\sum_i m_i$ — сумма масс ее отдельных частей, $E_{св}/c^2$ — масса, соответствующая энергии взаимодействия. Из последнего уравнения следует, что масса системы может быть больше или меньше суммы масс, ее составляющих. В наличии члена, учитывающего эффект взаимодействия, и заключается отличие классической трактовки закона сохранения массы от релятивистской.

В физике макроскопических тел и систем указанная поправка столь ничтожно мала, что учет ее практически не нужен. Но в области ядерной физики она приводит к важному результату. Атомное ядро представляет собой систему частиц, прочно связанных в единое целое ядерными силами притяжения. Для разрушения такой устойчивой системы на отдельные частицы необходимо затратить некоторую работу, которую принято называть энергией связи ядра.

Эта работа пойдет на увеличение энергии частиц, и, следовательно, их суммарная энергия $\sum_i E_i$ станет больше энергии всей системы на величину энергии связи $E_{св}$, т. е. $\sum E_i = E + E_{св}$. Разделим теперь обе части этого равенства на c^2 . Тогда будем иметь $\sum_i m_i = m + E_{св}/c^2$ или $E_{св}/c^2 = \sum_i m_i - m$. Разность между суммой масс отдельных частиц и массой всей

системы $\sum_i m_i - m = \Delta m$ называют дефектом массы.

Таким образом, между дефектом массы и энергией связи имеется соотношение $E_{\text{св}} = \Delta m c^2$. Отсюда видно, что мерой дефекта массы является энергия связи. Чем прочнее система, тем больше ее дефект массы и тем выше энергия связи.

Если подсчитать сумму масс отдельных нуклонов для разных элементов и сравнить полученный результат с массой соответствующего ядра, то обнаруживаются заметные дефекты масс. Например, для ядра атома гелия он составляет 0,03 атомных единицы массы, что соответствует энергии связи $4,5 \cdot 10^{-5}$ эрг. Аналогично можно подсчитать дефект масс при различных ядерных реакциях и соответствующую ему энергию связи, которая выделяется в форме «атомной энергии». Отметим, что для атомов, входящих в химические соединения, дефект масс значительно меньше. Так, для молекулы воды он имеет величину порядка 10^{-32} г, что соответствует энергии связи порядка 10^{-11} эрг.

Закон сохранения массы в его классической формулировке выполняется практически точно потому, что энергия, выделяемая при химических реакциях, в расчете на одну молекулу составляет в среднем 10^{-11} — 10^{-12} эрг. Эта величина ничтожно мала по сравнению с энергией покоя реагирующих молекул (10^{-4} — 10^{-5} эрг). Поэтому энергией связи $E_{\text{св}}$ можно пренебрегать, и тогда $m = \sum_i m_i$.

Что касается ядерных реакций, то в этом случае энергия связи в расчете на нуклон имеет величину порядка 10^{-5} эрг и сравнима с энергией покоя нуклонов. Энергией связи нуклонов пренебрегать уже нельзя, и поэтому закон сохранения массы в классической формулировке выполняться не будет. Будет выполняться закон сохранения полной массы m , поскольку сохраняется полная энергия системы. Освобождение ядерной энергии при делении урана и при термоядерных процессах является одним из экспериментальных подтверждений закона сохранения массы в его релятивистской трактовке.

Закон Эйнштейна о взаимосвязи массы и энергии подвергался неоднократной проверке начиная с 1931 г., когда английские физики Кокрофт и Уолтон осуществили ее с помощью сконструированного ими ускорителя частиц. Проверка этого закона проводилась и несколько иначе: по вычисленным дефектам масс и соответствующим им энергиям связи определялась скорость света. Во всех случаях получался вполне удовлетворительный результат.

Закон Эйнштейна отражает глубокую связь, существующую между важнейшими атрибутами материи — массой и энергией. Согласно точке зрения диалектического материализма поле и вещество как две формы материи отличаются друг от друга лишь качественно. Они могут превращаться друг в друга (см. ниже) в полном соответствии с законами сохранения, которым в равной мере подчиняются и поле и вещество. Закон взаимосвязи массы и энергии позволяет дать убедительное обоснование этому факту, и поэтому его можно считать наряду с законом сохранения и превращения энергии естественнонаучным обоснованием диалектического материализма¹⁾.

В отечественной физической и философской литературе на протяжении ряда лет обсуждались и подвергались критике различные идеалистические трактовки закона взаимосвязи массы и энергии. Авторы подобных трактовок утверждали, что масса эквивалентна энергии, что понятие материи можно подменить понятием энергии, что масса превращается в энергию, энергия обладает инертностью и т. п.²⁾. Таким образом, делались попытки возродить старые принципы энергетизма как «физической» формы идеализма на качественно новой основе. Советские физики и философы показали всю несостоятельность попыток подорвать устои материализма путем искаженных трактовок закона взаимосвязи массы и энергии. Формула Эйнштейна имеет один смысл: она показывает,

¹⁾ См. по этому поводу Н. Ф. Овчинников, Понятия массы и энергии в их историческом развитии и философском значении, Изд-во АН СССР, М., 1957.

²⁾ Там же. См. также Г. П. Мальковский, О массе и энергии в современной физике, Изд-во Казанского университета, 1961.

что для всех форм материи масса является мерой энергии и что при любых превращениях, связанных с изменением энергии, происходит и изменение массы системы, причем изменения их всегда пропорциональны друг другу. В этом факте находит свое отражение фундаментальное положение диалектического материализма о неразрывной связи материи и движения: нет материи без движения, так же как нет движения без материи.

Физический смысл закона Эйнштейна заключается в следующем: при распаде системы на отдельные составляющие ее части масса покоя системы превращается в релятивистскую массу ее отдельных частей, а полная энергия переходит частично в релятивистскую кинетическую энергию этих частей, частично превращается в другие формы энергии.

В связи с законом Эйнштейна в физике одно время дискутировался вопрос о том, следует ли считать законы сохранения массы и энергии самостоятельными законами или же закон Эйнштейна по сути дела объединяет их в единый закон сохранения массы и энергии. На первый взгляд может показаться, что такое объединение действительно произошло, так как сохранение массы автоматически ведет к сохранению энергии (ведь эти величины в законе Эйнштейна отличаются только коэффициентом пропорциональности). Однако считать формулу $E=mc^2$ выражением единого закона сохранения энергии и массы нельзя. Не следует забывать, что масса и энергия являются качественно различными атрибутами материи, которые не сводятся один к другому. Может быть, есть смысл говорить о едином законе сохранения и превращения массы и энергии, если принять во внимание возможность превращения материи в форме вещества, характеризуемой массой покоя, в материю в форме поля, для которой масса покоя отсутствует. Такого рода мысль высказывалась некоторыми учеными. Но и в данном случае следует помнить о существенном различии понятий массы и энергии.

Таким образом, мы видим, что в теории относительности классические законы сохранения претерпели весьма существенную эволюцию, явившуюся следствием коренных изменений, внесенных в наши

представления о пространстве, времени и движении. Релятивистская трактовка энергии и импульса в четырехмерном пространстве-времени как компонент единого четырехмерного тензора энергии-импульса позволила объединить соответствующие законы сохранения в единый закон сохранения энергии-импульса.

Специальная теория относительности обобщила и расширила содержание классических законов сохранения. Тем самым убедительно была показана истинность важнейшего положения диалектического материализма: между материей и формами ее существования — пространством и временем — существует неразрывная связь. Законы сохранения классической физики эту связь не отражали. В этом — важнейший методологический вывод рассмотренного обобщения.

Все сказанное выше относилось к законам сохранения в рамках специальной теории относительности, в которой не учитывалась роль гравитационного поля. Развитие общей теории относительности, основные положения которой были сформулированы Эйнштейном в 1916 г., вновь привлекло внимание физиков к сохраняющимся величинам и, в частности, к энергии. Важнейшим выводом общей теории относительности являлся вывод о зависимости свойств пространства-времени от свойств материальных объектов и характера их движения.

В специальной теории относительности существенными свойствами пространства-времени выступали их однородность и изотропность, что и позволило формулировать классические законы сохранения. В частности, закон сохранения энергии-импульса определялся пространственно-временной однородностью. В общей теории относительности проблема энергии значительно усложнилась. Действительно, пространство, заполненное полем тяготения, уже не могло быть однородным. Теперь уже основным моментом стала его неоднородность, различие его свойств в разных областях и в различные моменты времени. Естественно, возник вопрос о выполнимости закона сохранения энергии-импульса в этом случае.

Теория тяготения Эйнштейна предсказала существование гравитационных волн. Эти волны, как и электромагнитные, переносят энергию и импульс. Для

вычисления их энергии потребовалось вычислить энергию гравитационного поля. Именно в этом пункте и возникли трудности. Записать закон сохранения энергии для систем, включающих гравитационные поля, оказалось совсем не просто: гравитационное поле существенно отличается от других полей, например электромагнитного. Это отличие связано с тем, что гравитационные поля невозможно локализовать в замкнутой области, поскольку для них не существует «экранов». В то же время закон сохранения энергии справедлив, как и другие законы сохранения, только для замкнутых систем тел, частиц и полей.

Чтобы записать закон сохранения энергии для систем тел, связанных гравитационным полем и находящихся во внешнем гравитационном поле, необходимо включить эти поля в рассматриваемую изолированную систему. Но для гравитационного поля такой системой может быть только вся вселенная, так как любую ее часть невозможно изолировать от остальных.

На указанное обстоятельство впервые обратил внимание Э. Шредингер в 1918 г. В работе «Компоненты энергии гравитационного поля»¹⁾ он рассмотрел вопрос об энергии гравитационного поля шара и показал, что путем подбора соответствующих систем отсчета энергия в любой точке может быть обращена в нуль. Это дало ему возможность утверждать, что энергия-импульс гравитационного поля является фиктивной величиной и не имеет физического смысла. Точку зрения немецкого физика разделяли и некоторые другие ученые, в частности А. Эддингтон. Последний писал: «Потенциальная энергия и количество движения, которые нам нужны, если мы хотим удержать формальный вид закона сохранения, не образуют тензора; их нужно рассматривать как математическую функцию, а не как представление каких-либо имеющих физический смысл мировых соотношений»²⁾.

Против такой точки зрения выступил прежде всего сам Эйнштейн. Между ним и Шредингером в том же 1918 г. возникла дискуссия. Тогда же Эйнштейн

¹⁾ E. Schrödinger, *Physikalische Zeitschrift*, Bd. 19, S. 4, 1918.

²⁾ А. Эддингтон, *Теория относительности*, ГТТИ. М., 1934, стр. 279.

опубликовал специальную работу «Закон сохранения энергии в общей теории относительности»¹⁾), где показал, что в различных системах отсчета получается лишь различное распределение энергии-импульса и что в больших объемах вселенной, рассматриваемых как целое, энергия и импульс не могут быть «уничтожены» никаким подбором специальных систем отсчета. Он подчеркнул в этой работе свою убежденность в универсальном значении закона сохранения энергии-импульса.

Эйнштейн показал также, что решение проблемы энергии гравитационного поля связано для любых систем материальных объектов, включающих и гравитационное поле, с выбором определенных граничных условий. В некоторых специальных случаях такой подход к проблеме позволял вполне удовлетворительно решать вопрос об энергии гравитационного поля²⁾). Вообще же следует отметить, что вся эта проблема находится еще в стадии своего решения и здесь предстоит преодолеть ряд трудностей как принципиального, так и методологического характера. Ясно лишь одно: разрешение этих трудностей не может быть достигнуто ценой отказа от закона сохранения энергии.

Инвариантность и ковариантность физических законов — обобщение идеи сохранения

Роль теории относительности в развитии общей идеи сохранения не исчерпалась лишь обобщением классических законов сохранения. Теория относительности привлекла внимание физиков к такому важному свойству законов природы, как ковариантность и инвариантность. Свойство ковариантности заключается в том, что уравнения движения, записанные в ковариантной форме с помощью тензорного исчисления, имеют одинаковый вид во всех системах координат.

Следовательно, требование ковариантности, например, относительно преобразований Лоренца выражает факт независимости физического процесса от выбора

¹⁾ А. Эйнштейн, Собрание научных трудов, т. I, Изд-во «Наука», М., 1965, стр. 650.

²⁾ См., например, В. А. Фока, Теория пространства, времени и тяготения, Физматгиз, М., 1955.

инерциальной системы отсчета, хотя при этом значения отдельных физических величин могут быть различными в разных системах отсчета.

Инвариантность определяется как свойство неизменности геометрических и физических объектов по отношению к некоторой совокупности преобразований (составляющих так называемую группу преобразований). Таким образом, свойством инвариантности могут обладать как физические величины, так и уравнения, выражающие связь между ними.

Свойство ковариантности является более общим и включает по существу свойство инвариантности в качестве частного случая.

Свойство инвариантности физических законов тесно связано со свойствами пространства и времени, в частности с тем, что пространство однородно и изотропно. В свою очередь, эта связь имеет прямое отношение и к законам сохранения.

Н. Ф. Овчинников обратил внимание на то, что требование инвариантности законов природы (а тем более ковариантности) означает дальнейшее обобщение идеи сохранения, а именно что это требование означает сохранение законов природы, сохранение определенных отношений между физическими объектами. В своей статье, посвященной классификации законов сохранения, Н. Ф. Овчинников пишет: «Открытие сохранения отношений — одно из великих завоеваний естествознания. Эти принципы сохранения законов мы ... выделяем в особый класс принципов сохранения. В соответствии с принятой терминологией будем в дальнейшем называть эти принципы принципами инвариантности... Под принципами сохранения мы понимаем и сохранение вещей, и сохранение свойств, и сохранение отношений. Если речь идет только о сохранении вещей или сохранении свойств, мы будем говорить о законах сохранения. В силу особой важности принципов сохранения законов природы в широком смысле этого слова, иначе говоря, сохранения существенных отношений, нам кажется целесообразным называть их принципами инвариантности. Инвариантность законов механики по отношению к преобразованиям Галилея составляет содержание классического принципа относительности, инвариантность законов

механики и электродинамики по отношению к преобразованиям Лоренца — содержание принципа относительности в частной теории относительности»¹⁾). Н. Ф. Овчинников приходит к заключению, что «логический переход от сохранения вещей к сохранению свойств, а затем к сохранению отношений соответствует переходу от менее общих к более общим и, следовательно, более фундаментальным принципам сохранения».

На большое значение принципов инвариантности указывает и Е. Вигнер в своей статье «Симметрия и законы сохранения», где он, в частности, пишет, что функция принципов инвариантности «состоит в выявлении структуры или взаимосвязи законов природы, точно так же, как законы природы выявляют структуру и взаимосвязь совокупности событий»²⁾).

В заключение отметим, что связанная с принципами симметрии инвариантность предполагает неизменными законы природы, в то время как законы сохранения предполагают неизменяемость определенной физической величины. Именно в этом и состоит существенное отличие между принципами симметрии и законами сохранения.

¹⁾ Н. Ф. Овчинников, О классификации принципов сохранения, Вопросы философии № 5, 1962, стр. 78.

²⁾ Е. Вигнер, УФН, т. 83, в. 4, 1964, стр. 731.

ГЛАВА II

Симметрия, принципы инвариантности и законы сохранения

Учение о симметрии и ее связь с законами природы

Теория относительности в большой степени приковала внимание физиков к принципам инвариантности и их связи с общими законами природы. Особенно важное значение для последующего развития теоретической физики имело открытие связи между геометрическими принципами симметрии и законами сохранения классической физики, связи, которая уже в неявной форме заключалась в динамических законах механики.

Это обстоятельство, как указывает Е. Вигнер в цитированной выше статье, существенным образом повлияло на отношение физиков к проблемам симметрии: «С начала этого века наше отношение к симметриям и законам сохранения претерпело большие изменения. Немногие из статей, написанных ныне и посвященных фундаментальным вопросам физики, не содержат упоминания о постулатах инвариантности, а связь между законами сохранения и принципами инвариантности была признана, пожалуй, в слишком общем виде. Кроме того, понятие о симметрии и инвариантности было распространено на новую область — на область, где его корни значительно менее тесно связаны с непосредственным опытом и наблюдением, чем это имеет место для классической пространственно-временной симметрии»¹⁾.

¹⁾ УФН, т. 83, в. 4, 1964, стр. 730.

Понятие о симметрии известно хорошо из повседневного опыта в простейших ее проявлениях — в делении на правое и левое, в существовании положительного и отрицательного электричества, в правильном чередовании атомов и молекул в кристаллах и т. п. Симметрия встречается во всех явлениях, она существует как в живой, так и неживой природе. Понятие симметрии распространяется на пространство и время, на отдельные тела и физические процессы и, что особенно важно, — те или иные виды симметрии находят свое отражение в разнообразных физических законах¹⁾.

Простейшие представления о симметрии встречаются уже в учениях античных натурфилософов о природе, в учении древних астрономов о гармонии вселенной, в пифагорейском учении о числах и в геометрических построениях Евклида. Однако систематическое развитие учение о симметрии получает только во второй половине прошлого века. Математический аппарат теории симметрии — теория групп и связанные с ней вопросы геометрии и алгебры — получили развитие раньше, чем физики обратили внимание на роль симметрии в физических явлениях и законах. Это обстоятельство сыграло важную роль в развитии физических аспектов теории симметрии, так как к тому времени, когда физики вплотную занялись этими вопросами, они уже имели в своем распоряжении соответствующий математический аппарат.

Русский ученый — кристаллограф Е. С. Федоров и французский физик П. Кюри одними из первых выявили значение симметрии в физических явлениях. Мария Кюри следующим образом характеризует роль симметрии в природе: «Принцип симметрии является одним из тех немногочисленных великих принципов, которые господствуют в физических явлениях; исходя из понятий, вытекающих из опыта, они мало-помалу приобретают все более и более совершенную форму»²⁾.

Говоря о принципе симметрии, М. Кюри имеет в виду те общие закономерности симметрии, которые

¹⁾ Подробнее о симметрии см. кн.: А. С. Компанеец, О симметрии, Изд-во «Знание», М., 1965.

²⁾ М. Кюри, Пьер Кюри, «Молодая гвардия», М., 1959, стр. 25—26.

были открыты П. Кюри и выражены им в виде следующих положений:

1) Когда определенные причины порождают известные следствия, элементы симметрии причин должны вновь появиться в порожденных следствиях.

2) Когда известные следствия имеют в себе известную диссимметрию, эта последняя должна находиться и в породивших явление причинах.

В природе, особенно в органической, мы сплошь и рядом сталкиваемся с так называемой асимметрией, т. е. с неравноценностью, казалось бы, совершенно симметричных частей объекта. Например, правая рука сильнее левой, левовращающий никотин ядовитее правовращающего. Асимметричными являются вещества, составляющие основу жизни — аминокислоты, белки, углеводы, а также сами клетки организмов.

Понятие о симметрии с момента своего возникновения претерпело значительную эволюцию. Само слово «симметрия» означает «соразмерность» и первоначально относилось к симметрии предметов, тел. Немецкий математик Г. Вейль, много занимавшийся вопросом определения понятия симметрии, дал наиболее общее ее определение. Некоторый объект считается симметричным, если после определенных операций над ним (например, поворота, сдвига и т. п.) он будет выглядеть точно таким же, как и до операции. С развитием теоретической физики понятие симметрии было расширено и перенесено на физические законы. Вопрос при этом ставился так: «Что можно сделать с физическим явлением или ситуацией, возникшей при эксперименте, чтобы получился тот же самый результат?»¹⁾

Иначе говоря, симметрия понимается как инвариантность физических законов относительно некоторого преобразования величин, входящих в эти законы. Такой подход к вопросам симметрии и означал распространение последней из области геометрии на область физических законов. В соответствии с этим было предложено (Е. Вигнером) называть классические

¹⁾ Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс, Фейнмановские лекции по физике, в. 4, Изд-во «Мир», М., 1965, стр. 238.

принципы инвариантности, связанные с геометрической симметрией, геометрическими принципами инвариантности, а те принципы инвариантности, которые связаны с внутренней симметрией физических систем,— динамическими принципами инвариантности. Мы увидим, что геометрические принципы инвариантности тесно связаны с классическими законами сохранения, в то время как динамические принципы играют решающую роль в структуре тех новых законов сохранения, которым подчиняются объекты микромира. Наиболее существенное различие между двумя принципами инвариантности Вигнер сформулировал следующим образом: «Геометрические принципы инвариантности, хотя они и определяют структуру законов природы, формулируются в терминах самих событий. Так, сформулированная должным образом инвариантность относительно сдвига во времени выглядит следующим образом: корреляции между событиями зависят только от промежутков времени между ними и не зависят от момента времени, в который произошло первое событие... С другой стороны, новые динамические принципы инвариантности формулируются в терминах законов природы. Они применяются к определенным видам взаимодействия, а не к какой-либо корреляции между событиями»¹⁾).

Рассмотрим связь между геометрическими принципами инвариантности и классическими законами сохранения. Прежде всего отметим следующие формы симметрий, имеющих отношение к свойствам пространства и времени: зеркальная симметрия, диссимметрия, антисимметрия, асимметрия и совместимая симметрия. Особенно важной является зеркальная симметрия, определяющая те свойства пространства и времени, на интуитивном признании которых строилась по существу вся классическая физика, начиная с Галилея и Ньютона. Эти свойства соответствуют всему жизненному опыту человечества и поэтому в скрытой форме фигурировали во всех его естественнонаучных концепциях. Свойства эти следующие.

¹⁾ УФН, т. 83, вып. 4, 1964, стр. 731.

Пространство однородно. Как помнит читатель, это означает отсутствие избранных точек отсчета. Иными словами, любая точка пространства может быть взята за начало отсчета инерциальной системы координат, и течение физического процесса в ней от этого не изменится. Именно свойство однородности пространства и определяет равноправие всех инерциальных систем отсчета, выражением чего, как известно, является классический принцип относительности Галилея.

Пространство изотропно. Это означает, что в пространстве нет никаких преимущественных, избранных, направлений. Так, например, при перемещении из любой точки пространства в любом направлении тело ни в одном из них не получит каких-либо преимуществ ни в скорости перемещения, ни в энергии, ни в чем-либо другом.

Время однородно. Это означает, что течение физических процессов не зависит от выбора начального момента времени. Любой физический процесс имеет определенную длительность, начало и конец. Однородность времени означает, что «абсолютные положения» начального и конечного моментов не существенны для протекания процесса.

Выше говорилось о том, что механика Галилея — Ньютона явилась как бы физическим отражением указанных свойств пространства и времени, что динамические законы непосредственно выражали свойства однородности и изотропности пространства и времени.

Естественно, по мере развития классической механики связь между свойствами симметрии пространства и времени и законами динамики должна была выявляться все более и более отчетливо. Действительно, в трудах Эйлера, Даламбера и особенно Лагранжа и Гамильтона эта связь вырисовывается весьма четко. От работ Лагранжа можно уже непосредственно проследить связь между свойствами симметрии пространства-времени и законами сохранения энергии, импульса и момента количества движения. Это видно хотя бы из того факта, что Лагранж впервые рассмотрел эти законы как интегралы дифференциальных уравнений динамики. Существенную роль в дальнейшем развитии идеи взаимосвязи свойств симметрии с законами сохранения сыграли работы

выдающегося норвежского математика Софуса Ли в области теории групп и в выяснении той роли, которую играют теоретико-групповые методы в классической динамике. Немецкий ученый Г. Гамель в 1904 г. основные свойства симметрии пространства и времени принял в качестве аксиом и указал на их связь с законами механики¹⁾. Гамель отметил, что «в основе механики лежат общие аксиомы природы: А) время и пространство однородно; В) пространство изотропно»²⁾. В своем курсе теоретической механики он развил эти идеи, подчеркнув, что именно свойства пространства и времени определяют вид механических законов³⁾.

В период до создания теории относительности роль рассмотренных идей в развитии теоретической физики вряд ли осознавалась большинством ученых. Ограниченные рамками механики, эти идеи рассматривались как красивые, но практически бесполезные абстракции.

Положение существенно изменилось с развитием релятивистской физики. В работе Ф. Энгеля было показано влияние идей релятивизма на связь законов сохранения с принципами симметрии⁴⁾. Центральным отправным пунктом развития этой связи в теоретической физике следует считать теорему, открытую Эмми Нётер в 1918 г. Существо этой теоремы заключается в утверждении, что каждому свойству симметрии должен соответствовать определенный закон сохранения.

Некоторые физико-математические вопросы

Непосредственный толчок исследованиям Э. Нётер дали работы по теории относительности А. Эйнштейна и Г. Минковского, а также специальные математические исследования выдающихся математиков Д. Гильберта и Ф. Клейна, в которых были рассмотрены геометрические и физические аспекты идеи взаимосвязи свойств симметрии с законами физики.

¹⁾ G. Hamel, Zeitschrift für Math., Bd. 50, 1904, S. 1.

²⁾ G. Hamel, Die Axiome der Mechanik. Handb. d. Physik, V. Berlin, 1926, S. 6.

³⁾ G. Hamel, Theoretische Mechanik, Leipzig, 1912.

⁴⁾ F. Engel, Götting. Nachrichten, 1916, S. 270.

Важнейшим математическим понятием, необходимым для описания симметрии и ее количественного выражения, является понятие группы. Теория групп возникла в связи с задачей о разрешимости алгебраических уравнений высших степеней в радикалах. В этой задаче впервые обнаружилось, что свойство симметрии корней уравнения играет основную роль в его решении. По мере выяснения той роли, которую закономерности симметрии играют в механике, геометрии, физике и других науках, получала все большее и большее развитие теория групп, ее методы и результаты. В конечном счете теория групп оказалась важной не только для изучения закономерностей симметрии, но и для решения многих других проблем физики и математики.

Рассмотрим понятие группы в связи с вопросами симметрии. Мы уже говорили, что простейшим и вместе с тем очень важным видом симметрии является зеркальная симметрия. Некоторая точка A пространства будет зеркально-симметричной относительно точки B , если плоскость P пересекает отрезок AB точно в его середине. Геометрическое тело будет зеркально-симметричным относительно плоскости, если эта плоскость разбивает тело на две части, из которых каждая является зеркальным отражением другой относительно той же плоскости. Преобразование пространства, которое соответствует зеркальной симметрии, называется преобразованием инверсии. При таком преобразовании знаки у всех координат одновременно изменяются на противоположные.

Перед математиками возникла проблема дать такое определение симметрии, которое охватывало бы все ее виды. Это определение оказалось тесно связанным с понятием преобразования.

Пусть M обозначает конечную или бесконечную совокупность произвольных объектов, например совокупность чисел $1, 2, 3, \dots$, совокупность переменных x_1, x_2, x_3, \dots , множество всех точек плоскости и т. д. Если каждому элементу множества M поставлен в соответствие вполне определенный элемент того же множества M , то говорят, что задано преобразование множества M . Например, можно выбрать в пространстве какую-либо ось и поставить в соответствие

каждой точке A пространства точку B , получаемую путем поворота точки A вокруг этой оси на некоторый угол. Тем самым определяется преобразование совокупности всех точек пространства, которое естественно назвать поворотом пространства относительно оси. Другим важным видом преобразования пространства является параллельный перенос всех точек пространства на заданное расстояние, при котором совокупности точек A, B, C, \dots сопоставлена совокупность A_1, B_1, C_1, \dots

С каждым видом симметрии связано определенное преобразование пространства. Так, симметрии относительно плоскости соответствует преобразование, при котором каждой точке пространства ставится в соответствие точка, симметричная относительно этой плоскости.

Важным видом преобразований являются взаимно однозначные преобразования, при которых не только каждому элементу множества M отвечает единственный элемент этого множества, но и для каждого элемента множества M существует один и только один соответствующий ему элемент того же множества. В этом смысле рассмотренные выше преобразования пространства — поворот и параллельный перенос — являются взаимно однозначными преобразованиями, так как каждой точке пространства соответствует одна и только одна точка, в которую она переходит¹⁾.

Элементы множества находятся обычно в каком-либо отношении друг к другу. Для математических проблем симметрии и физики в первую очередь важными являются такие преобразования, которые не нарушают каких-либо учитываемых связей между элементами множества. В частности, для точек пространства важным является понятие расстояния между двумя точками, которое учитывает такую связь между ними, что любые две точки находятся на неизменном расстоянии друг от друга. Преобразования, не нарушающие именно этой связи, называются движениями пространства.

¹⁾ Подробно см. сб. «Математика, ее содержание, методы и значение», т. III. Изд-во АН СССР, М., 1956, стр. 248 и сл.

Теперь нам известны все понятия, необходимые для общего определения симметрии. Пусть дано множество M , в котором учитываются определенные связи между элементами, и пусть P есть некоторая часть M (подмножество). Говорят, что совокупность P симметрична, или же инвариантна, относительно некоторого допустимого преобразования A (т. е. такого, которое не нарушает тех или иных учитываемых связей между элементами множества) множества M , если преобразование A переводит каждый элемент подмножества P снова в элемент того же подмножества. Понятие симметрии тел в пространстве вполне подходит под это общее определение. В этом случае роль множества M играет все пространство, роль допустимых преобразований — движения, роль P — данное тело. Симметрия тела P характеризуется, следовательно, совокупностью движений, при которых тело P совмещается само с собой.

Параллельный перенос и поворот пространства являются именно такими преобразованиями, при которых расстояния между точками не изменяются. В свою очередь, движение пространства есть либо поворот, либо параллельный перенос, либо некоторые другие простейшие формы движения (винтовое движение — одновременный поворот вокруг оси с параллельным переносом вдоль этой оси, отражение относительно плоскости и др.).

Выясним теперь смысл понятия группы и ее связи с рассмотренными выше определениями. Совокупность преобразований, характеризующих симметрию некоторой фигуры, должна удовлетворять следующим свойствам:

1) произведение двух преобразований, т. е. их последовательное проведение, должно привести к преобразованию, принадлежащему данной совокупности. Например, винтовые движения можно рассматривать как произведение из поворотов вокруг оси и сдвигов вдоль этой оси;

2) тождественное преобразование принадлежит данной совокупности. Например, двукратное отражение в одной плоскости является тождественным преобразованием;

3) если преобразование принадлежит совокупности, то обратное преобразование также принадлежит этой совокупности.

Всякая совокупность взаимно однозначных преобразований множества M , обладающая этими тремя свойствами, образует группу преобразований этого множества. Следовательно, совокупность всех преобразований симметрии данного тела, в том числе и движения пространства, образует группу. (В современной математике понятие группы несравненно шире, однако в течение XIX в. теория групп развивалась главным образом применительно к преобразованиям.)

Говоря о преобразованиях, мы приводили в качестве примеров геометрические перемещения тела. Однако в современной физике важны не эти перемещения, а свойства симметрии, связанные с теми преобразованиями координат, которые оставляют инвариантными определенные комбинации функций и их производных, описывающих движение, или изменение определенных физических объектов (тел, частиц и полей). В математической форме эти движения или изменения описываются соответствующими дифференциальными уравнениями.

Наиболее общей формулировкой закона движения механических систем является так называемый принцип наименьшего действия, или принцип Гамильтона, согласно которому каждая механическая система характеризуется определенной функцией обобщенных координат q_1, q_2, \dots, q_k , их производных $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_k$ и временем t , т. е. функцией $L(q, \dot{q}, t)$. Функция L называется функцией Лагранжа данной физической системы. Эта функция такова, что интеграл

$$S = \int_{t_0}^t L(q, \dot{q}, t) dt,$$

называемый действием (его размерность — произведение энергии на время), обладает следующим свойством: среди всех кинематически возможных перемещений физической системы из одного данного положения в другое, близкое к первому, совершаемых за один и тот же промежуток времени, начинающийся в момент t_0 и заканчивающийся в момент t , действи-

тельным является то перемещение, для которого S будет минимальным. Это свойство S позволяет найти дифференциальные уравнения движения системы из вариационного условия $\delta S = 0$. Именно таким образом из принципа Гамильтона получается дифференциальное уравнение Лагранжа $\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = 0$ (или система таких уравнений), описывающее движение системы.

Вид функции Лагранжа, или, как принято говорить, лагранжиана, тесно связан со свойствами симметрии пространства и времени, и это определяет ту исключительную роль, которую играет лагранжиан в описании свойств физических систем.

Рассмотрим пример, поясняющий сказанное. Пусть в некоторой инерциальной системе отсчета движется материальная точка. Однородность пространства и времени означает, что лагранжиан не должен содержать в явной форме ни координат q , ни времени t , и, следовательно, он должен являться только функцией скоростей \dot{q} . Так как пространство обладает также и свойством изотропности, то лагранжиан не должен зависеть и от направления вектора скорости. Последнее может иметь место только в том случае, когда лагранжиан будет функцией только квадрата скорости, т. е. $L = L(v^2)$.

Следовательно, уравнение Лагранжа, описывающее движение точки, будет иметь вид $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial v} \right) = 0$.

Отсюда следует, что $\frac{\partial L}{\partial v} = \text{const}$, а так как $L = L(v^2)$, то это дает для скорости значение: $v = \text{const}$.

Мы приходим к важному заключению: если пространство и время обладают однородностью и изотропностью, то в нашей системе отсчета свободное движение будет всегда являться движением с постоянной скоростью, т. е. будет выполняться закон инерции. Таким образом, существование в природе инерциальных систем является прямым следствием особых свойств симметрии пространства и времени. Справедливо и обратное утверждение: если бы пространство не обладало однородностью и изотропностью и время не было бы однородным, то инерциальных систем

отсчета не существовало бы. Физические законы, в частности законы механики, в таком пространстве-времени были бы совершенно отличными от известных нам законов.

Как известно, инерциальных систем существует бесконечное множество. Все они движутся равномерно и прямолинейно относительно друг друга, и, как показывает опыт, все механические явления в них протекают совершенно одинаково. Этот вывод известен как классический принцип относительности Галилея.

Классический принцип относительности можно сформулировать также как требование инвариантности уравнений движения (законов Ньютона) относительно преобразований Галилея. Последние устанавливают зависимость между координатами и временем данного события в двух инерциальных системах отсчета. Как мы видели в предыдущей главе, в теории относительности преобразования Лоренца, которые являются обобщением преобразований Галилея, также тесно связаны со свойствами четырехмерного пространства-времени. Законы движения, устанавливаемые теорией относительности, будут инвариантными относительно этих преобразований. Таким образом, мы видим тесную связь между преобразованиями и свойством инвариантности.

Необходимо еще сделать несколько замечаний относительно понятия группы. Успехи теории групп в решении алгебраических уравнений привели математиков к мысли использовать аппарат этой теории и для решения дифференциальных уравнений, которые, собственно, и описывают законы движения и изменения рассматриваемых объектов. Это привело к расширению понятия группы: если группы алгебраических уравнений состоят из конечного числа преобразований, то группы дифференциальных уравнений содержат бесконечное число преобразований. Особо важный класс таких групп составляют так называемые непрерывные группы, элементы которых непрерывно зависят от значений системы параметров. Важность их обусловлена тем обстоятельством, что они имеют непосредственное отношение к законам движения тел. Эти группы называются группами Ли в честь математика, положившего начало их изучению.

С каждой группой связана определенная система инвариантов относительно преобразований, составляющих данную группу. Особую роль играют инварианты группы взаимно однозначных преобразований (группы движения пространства).

Плодотворность теоретико-группового подхода к изучению физико-математических проблем была продемонстрирована в так называемой «Эрлангенской программе» немецкого математика Феликса Клейна. Основная идея этой программы состояла в том, чтобы изучать и классифицировать различные виды геометрий (проективную, аналитическую, неевклидову и др.) по структурам соответствующих им групп и находить систему инвариантов некоторой группы преобразований. Вот как сам автор этой идеи определяет основную задачу теоретико-группового подхода к геометрии: «Дано многообразие и в нем группа преобразований; нужно исследовать те свойства образов, принадлежащих многообразию, которые не изменяются от преобразования группы...». Или иными словами: «Дано многообразие и в нем группа преобразований. Требуется развить теорию инвариантов этой группы»¹⁾. Логическая красота и стройность этой идеи не могла не явиться предметом подражания в других областях математики и физики.

Теорема Нётер. Пространство, время и законы сохранения

Именно в духе «Эрлангенской программы» провела свои исследования Э. Нётер. Важнейшим результатом ее исследований явилось выяснение той фундаментальной роли, которую играют группы преобразований и их инварианты в построении общей физической теории. Столь же важным методологическим выводом теоремы Нётер было установление связи между законами сохранения классической физики и свойствами симметрии пространства и времени.

Основополагающая работа Э. Нётер называлась «Инвариантные вариационные задачи» и была

¹⁾ Ф. Клейн, Сравнительное обозрение новейших геометрических исследований; в сб. «Об основаниях геометрии», М., 1956, стр. 402.

доложена Математическому обществу 26 июля 1918 г. Посвящение работы «Ф. Клейну, к пятидесятилетию докторского юбилея» говорит о большом влиянии на нее идей знаменитого математика.

В работе Нётер был развит общий метод получения системы инвариантов (сохраняющихся величин) любой физической теории, если ее закономерности описываются дифференциальными уравнениями Лагранжа или Гамильтона. Основу метода составляет связь между постоянными интегрирования этих уравнений с инвариантами групп Ли.

Содержание теоремы Нётер заключается по существу в утверждении, что всякому непрерывному преобразованию координат, обращающему в нуль вариацию действия, когда задан также и закон преобразования, соответствует определенный инвариант, т. е. некоторая сохраняющаяся величина, составленная из соответствующих функций и их производных. А так как преобразования тесно связаны со свойствами симметрии пространства и времени, то последнее утверждение означает, что каждому свойству пространства и времени, выраженному в ковариантности дифференциальных уравнений относительно определенной группы преобразований, должен соответствовать определенный закон сохранения.

Преобразования, оставляющие инвариантными дифференциальные уравнения, описывающие движение физических объектов в пространстве и времени, нам уже знакомы. Это следующие преобразования:

1) параллельный перенос начала координат, выражающий свойство однородности пространства и времени;

2) пространственные вращения, выражающие свойство изотропности пространства;

3) принцип относительности Эйнштейна, выражающий свойства четырехмерного пространства-времени, в частности инвариантность соответствующих уравнений относительно преобразований Лоренца;

4) преобразования инверсии (в частности, зеркальные отражения). Согласно теореме Нётер каждому из этих преобразований (относительно них функция Лагранжа будет инвариантна) соответствуют следующие законы сохранения: инвариантности ла-

гранжиана относительно смещений начала времени (однородности времени) — закон сохранения энергии; инвариантности лагранжиана относительно пространственных поворотов (изотропности пространства) — закон сохранения момента импульса; инвариантности лагранжиана относительно смещений начала отсчета (однородности пространства) — закон сохранения импульса. Остальным преобразованиям будут также соответствовать свои специфические законы сохранения. (Следует отметить, что преобразованию инверсии в классической физике не отвечает никакой закон сохранения.)

Физическое содержание этих выводов из теоремы Нётер достаточно ясно. Тот факт, что закон сохранения энергии вытекает из однородности времени, означает, что течение времени само по себе не может вызывать изменение физических состояний некоторой замкнутой системы. Изменения могут произойти только за счет затраты определенного количества энергии. Иными словами, непрерывное развитие, изменение материи во времени обеспечено постоянным действием закона сохранения энергии. Связь закона сохранения количества движения (импульса) со свойством однородности пространства означает, что перемещение замкнутой системы недостаточно для изменения ее состояния. Последнее может произойти только в результате взаимодействия данной системы с другими системами. Связь закона сохранения момента количества движения со свойством изотропности пространства означает, что поворот замкнутой системы в пространстве не изменяет механических свойств этой системы.

В свете изложенных идей решается и старый вопрос о двух мерах движения в механике: необходимость существования двух мер движения — скалярной и векторной — непосредственно вытекает из свойств симметрии пространства и времени. Скалярная мера механического движения — это кинетическая энергия, свойство сохранения которой является следствием однородности времени. Векторная мера — это импульс, сохранение которого является следствием однородности пространства. «В нашем пространстве и времени может существовать только двоякая

мера механического движения — скалярно-векторная мера, обе составные части которой — кинетическая энергия и импульс — определяются скоростью частицы. Характер их зависимости от скорости определяется с помощью принципа относительности однозначно: импульс просто пропорционален скорости, а энергия зависит от скорости квадратично. Масса, т. е. величина, связывающая обе меры со скоростью, оказывается не зависящим от скорости свойством вещества, т. е. постоянной, зависящей только от природы частицы»¹⁾).

В классической механике пространство и время не взаимосвязаны, поэтому обе меры выступают раздельно. В теории относительности пространство и время выступают в тесной взаимосвязи, поэтому обе меры движения объединяются в единую меру. Скалярная и векторная меры движения при этом выступают как составляющие этой единой меры.

В общем случае теорема Нётер приводит к заключению, что для любой замкнутой физической системы должно существовать 10 сохраняющихся величин: 3 компоненты импульса, 6 компонент момента импульса и энергия.

Значение теоремы Нётер не ограничивается только геометрическими принципами инвариантности. При наличии в системе динамических симметрий, т. е. связанных не с пространством и временем, а с определенным типом взаимодействия, теорема Нётер также позволяет найти соответствующие сохраняющиеся величины. Именно таким образом может быть обоснован в общем случае закон сохранения электрического заряда.

Для описания взаимодействия электрического заряда с электромагнитным полем вводятся электромагнитные потенциалы, позволяющие вычислить компоненты этого поля. Эти потенциалы определяются неоднозначно: потенциалы, отличающиеся друг от друга на величину градиента произвольной функции, описывают одно и то же поле. Таким образом, потенциалы не могут быть измеримыми величинами. Измери-

¹⁾ Сб. «Философские вопросы современной физики», М., 1958, стр. 117.

мыми будут лишь такие величины, которые инвариантны относительно преобразований, связанных с произволом в потенциалах. Если назвать калибровкой определенное правило выбора значений некоторых характеристик поля, после применения которого дальнейший произвол в выборе их значений полностью или частично устраняется, то можно говорить о так называемых калибровочных преобразованиях как о процессе перехода от одних значений, характеризующих поле величин, к другим, оставляющим без изменения значения этих характеристик. Физический смысл калибровочных преобразований связан с инвариантностью лагранжиана электромагнитного поля относительно этих преобразований. Согласно теореме Нётер эта инвариантность должна привести к определенному закону сохранения. Сохраняющейся величиной в данном случае и будет электрический заряд.

В более общем плане учения о симметрии можно сказать, что электромагнитные взаимодействия имеют свою калибровочную группу, и закон сохранения электрического заряда выражает инвариантность относительно калибровочных преобразований.

Теорема Нётер, как видно из изложенного, является одной из важнейших теорем современной физики. Ее роль как в классической, так и в современной физике очень велика. Это особенно относится к квантовой теории полей, где теорема Нётер позволяет найти все специфические для данной теории сохраняющиеся величины и выявить таким путем структуру и свойства поля.

Эта теорема расширила содержание принципа относительности в той части, которая связана с инвариантностью законов природы, конкретизировала связь между свойствами пространства и времени и физическими законами. Она дала метод нахождения системы инвариантов любой физической теории.

Большое значение имеет и методологическая сторона теоремы Нётер. Она со всей наглядностью показала то, что уже содержалось во всех физических теориях, начиная с классической механики, а именно, что «стержневой идеей всей новой физики..., развитой и подтвержденной всем прогрессом науки, можно считать мысль об однородности и изотроп-

ности пространства и времени... Развитие физики в XVIII—XX вв. бесспорно подтверждает такую оценку.

Более того, можно представить всю историю физики от Галилея до теории относительности исключительно как последовательное обобщение идей однородности и изотропности: сначала идея однородности и изотропности была применена к пространству и привела к представлению о космической инерции (Галилей), прямолинейной инерции и сохранении импульса (Декарт) и к принципу относительности инерционного движения (Ньютон). Затем появилась (впрочем, неявно) идея однородности времени, лежащая в основе закона сохранения энергии — стержня всей физики XIX в. Наконец, в специальной теории относительности появилась идея изотропности пространственно-временного мира и в общей теории относительности — искривленного мира»¹⁾).

В заключение отметим следующее: установленная физикой XX в. взаимосвязь между законами сохранения и свойствами пространства и времени не означает, естественно, что законы сохранения являются следствием свойств пространственно-временной симметрии нашего мира в том смысле, что пространство и время как бы порождают законы сохранения. Если бы это было действительно так, то это означало бы, что фундаментальные свойства материи порождаются пространством и временем.

Точка же зрения диалектического материализма, как известно, сводится к тому, что пространство и время являются формами существования материи и не могут быть сведены ни к самой материи, ни к ее атрибутам. Но, являясь формами существования материи, пространство и время тесно с ней связаны, и эта взаимосвязь, в частности, проявляется в зависимости законов сохранения от свойств симметрии пространства и времени. В философском плане содержание теоремы Нётер сводится к утверждению, что из известных свойств пространства и времени как форм существования материи можно теоретически вывести

¹⁾ Б. Г. Кузнецов, Принципы классической физики, стр. 137—138.

законы сохранения, управляющие движением этой материи.

Для наглядности сопоставим законы сохранения классической физики с соответствующими формами симметрии.

Наименование закона сохранения	Инвариантность лагранжиана относительно	Форма симметрии
Закон сохранения энергии	Смещений начала отсчета времени	Однородность времени
Закон сохранения импульса	Смещений начала отсчета координат	Однородность пространства
Закон сохранения момента количества движения	Пространственных поворотов	Изотропность пространства
Закон сохранения количества электричества	Калибровочных преобразований	Симметрия электромагнитного взаимодействия

ГЛАВА III

Законы сохранения в микромире

Квантовая теория — фундамент физики микромира

Развитие классической физики на рубеже XIX и XX вв. выдвинуло ряд сложных и нерешенных проблем. Теория относительности показала ограниченность классических представлений о пространстве, времени и движении. Исследование теплового излучения, открытие рентгеновских лучей, явления радиоактивности, изучение свойств электрона заставили физиков пересмотреть старые классические представления о веществе и излучении. Постепенно стало ясно, что на смену физике Галилея — Ньютона идет новая, значительно более общая теория физических явлений, порывающая со многими привычными представлениями.

Перед физиками, естественно, возник вопрос: если новые открытия и новые теории затрагивают саму основу наших представлений о природе и ее законах, то не означает ли крушение старых представлений одновременно и крушение законов сохранения? Вопрос этот не был праздным, поскольку, действительно, некоторые ученые в период бурной ломки классических представлений склонны были считать, что по крайней мере некоторые из этих законов, например закон сохранения энергии, не выполняются в радиоактивных процессах.

Однако развитие современной физики не только не опровергло классические законы сохранения, но, напротив, показало их безусловное выполнение во всех известных науке физических процессах. Более

того, современная физика позволила значительно глубже проникнуть в существо законов сохранения и выявить новые их связи с наиболее фундаментальными свойствами материи, движения, пространства и времени. Вместе с тем изменилась и внешняя форма законов сохранения. Они приобрели значительно более общую формулировку по сравнению с формулировкой в классической физике.

По мере проникновения в глубинные свойства материи выяснилось, что микропроцессы подчиняются не только классическим законам сохранения, но также и совершенно не известным классической физике своим специфическим законам сохранения. Важнейшим результатом развития современной физики явилось убеждение в универсальном значении сохраняющихся величин и определение их роли в построении физических теорий. Поиски законов сохранения, по выражению известного немецкого физика Лауэ, стали «не только вполне оправданным направлением научного исследования, но и чрезвычайно важным направлением», поскольку «простейшей формой общего закона является утверждение о сохранении некоторой частной величины»¹⁾.

Развитие современной физики началось с пересмотра классических представлений о процессах элементарного обмена энергией. В свою очередь, необходимость такого пересмотра была стимулирована неразрешимыми в рамках классической физики противоречиями между теорией и экспериментом в области теплового излучения. Квантовая гипотеза, возникшая на рубеже столетий и разрешившая указанные противоречия, в скором времени стала одной из руководящих теорий современной физики. В совершенно новом свете предстали в рамках этой теории классические сохраняющиеся величины — энергия и импульс, а также процессы обмена этими величинами между микрочастицами.

Одним из важнейших результатов квантовой теории было введение в современную физику новой универсальной константы h , получившей наименование постоянной Планка в честь основоположника этой

¹⁾ М. Лауэ, Инерция и энергия, УФН, т. 67, в. 4, 1959.

теории. Наряду со скоростью света, зарядом электрона и некоторыми другими константами постоянная Планка стала фундаментальной константой микромира.

Теория квантов знаменовала собой прежде всего пересмотр классических представлений об энергетическом обмене между телами. Непрерывный процесс излучения и поглощения энергии в классической физике оказался, согласно квантовой теории, дискретным, прерывным процессом: всякое тело может испускать или поглощать энергию только порциями — квантами, величина которых равна $\varepsilon = h\nu$, где ν — частота излучения.

В результате многочисленных экспериментов и последовательного логического развития квантовой гипотезы была выявлена ее огромная эвристическая ценность. Было показано, что квантовые представления имеют одинаковую силу как для излучения, так и для вещества. Этот факт имел колоссальное значение для последующего развития физики, поскольку именно таким путем удалось правильно объяснить огромную совокупность экспериментальных фактов, в отношении которых выводы классической физики были неверны или сомнительны. По выражению де Бройля «кванты, как масляное пятно, быстро пропитали собой все области физики»¹⁾.

Уже первые применения квантовой теории для объяснения нерешенных проблем классической физики были тесно связаны с законами сохранения. Эти исследования показали, что и в новых специфических процессах взаимодействия вещества и излучения законы сохранения выполняются столь же неукоснительно, как и в классической физике.

В течение первого десятилетия своего существования квантовая теория разрешила три фундаментальные проблемы, в отношении которых классическая физика оказывалась бессильной. Это проблема фотоэффекта, теория теплоемкости твердых тел и теория атома.

¹⁾ Л. де Бройль, Исследования по теории квантов. В сб. «Вариационные принципы механики», Физматгиз, М., 1959, стр. 643.

Анализируя законы фотоэффекта с точки зрения квантовой гипотезы, Эйнштейн в 1905 г. показал, что все эти законы объясняются без труда, если в соответствии с законом сохранения энергии предположить, что энергия $h\nu$ кванта, падающего на поверхность металла, расходуется частично на работу выхода электрона из металла A и на сообщение электрону кинетической энергии: $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$. Уравне-

ние Эйнштейна было неоднократно проверено тонкими экспериментами рядом физиков, например А. Ф. Иоффе, П. И. Лукирским и С. С. Прилежаевым и др., и полностью подтвердилось.

Эйнштейн также пришел к заключению, что свет следует рассматривать как поток квантов-фотонов. Он показал, что если энергия испускается и поглощается квантами, то столь же дискретным должно быть излучение и тогда, когда оно уже испущено одним атомом, но еще не поглощено другим.

Эйнштейн был одним из немногих в то время физиков, кто понял научную ценность квантовой гипотезы Планка. Неудивительно поэтому, что ему же принадлежит заслуга в объяснении и другой трудности классической физики — проблемы теплоемкости твердого тела. Еще в 20-х гг. XIX в. французские физики Дюлонг и Пти установили закон, согласно которому грамм-атомная теплоемкость всех кристаллически простых тел равна приблизительно 6 калориям и не зависит от температуры. Закон Дюлонга и Пти был объяснен теоретически во второй половине XIX в., после создания Клаузиусом, Максвеллом и Больцманом молекулярно-кинетической теории. В основе классической теории теплоемкостей лежал закон равномерного распределения энергии по степеням свободы. Закон Дюлонга и Пти непосредственно явился следствием указанного равномерного распределения энергии. Относительно этого распределения среди физиков было много споров, в которых принимали участие выдающиеся ученые — В. Томсон, Д. Джинс, Рэлей и др. Одни из них считали его универсальным, другие полагали, что действие его ограничено. На последнее обстоятельство указывали также и теоретические исследования в области теории теплового излучения.

Не является ли закон равномерного распределения энергии по степеням свободы причиной расхождения теории и опыта? Такой вопрос возник у Эйнштейна, когда он обдумывал проблему теплоемкости твердых тел. Эйнштейн был уверен, что и в этом случае гипотеза квантов приведет к правильному решению. И он не ошибся. Перенеся планковские идеи на твердое тело и заменив закон равномерного распределения энергии законом Планка, он получил формулу, которая давала качественно правильную картину температурной зависимости теплоемкости твердого тела и содержала закон Дюлонга и Пти как предельный случай. Последнее явилось результатом того, что закон равномерного распределения энергии сам вытекал из закона Планка как предельный его случай.

Квантовая теория устранила также несоответствие между теорией и опытом в области теплоемкости газов.

Третьей нерешенной проблемой классической физики была проблема устойчивости атома. В рассматриваемый нами период теория строения атома была еще на заре своего развития. Известный английский физик Резерфорд на основе исследований рассеяния альфа-частиц веществами предложил планетарную модель атома, которая рассматривала его как образование, состоящее из положительно заряженного ядра и электронной оболочки. Проведенный на основе классической электродинамики расчет этой модели показал, что атом должен быть неустойчив. Действительно, в результате ускоренного движения электронов по орбитам атом должен непрерывно излучать электромагнитную энергию, исчерпав которую он за короткий срок прекратит свое существование. Между тем опыт показывал, что атомы — очень устойчивые образования. Положение было таково, «точно из-под ног ушла земля и нигде не было видно твердой почвы, на которой можно было бы стоять», — писал по этому поводу Эйнштейн.

Через два года после работ Резерфорда, в 1913 г., датский физик Нильс Бор указал путь преодоления возникшей в теории атома трудности. Согласно Бору, модель атома Резерфорда необходимо было видоизменить на основе квантовых представлений, поскольку

законы классической физики недостаточны для описания явлений атомного масштаба. Бор смело перенес планковские идеи в теории излучения на атом водорода. Согласно Бору, существуют дискретные стационарные состояния атомов, в которых атом не излучает энергию. Излучение происходит только в том случае, когда электрон в атоме переходит с одного дискретного энергетического уровня на другой, где его энергия меньше. Разница энергий излучается в виде светового кванта. Эти дискретные уровни можно вычислить по законам классической физики, если только дополнить их квантовыми условиями. Последние Бор сформулировал в виде двух постулатов. Первый постулат определяет радиусы стационарных орбит. Для нас он особенно интересен тем, что здесь понятие дискретности было впервые перенесено с энергии на количество движений. Этот постулат утверждает, что стационарными будут только те орбиты, на которых электрон будет обладать моментом количества движения, кратным величине $h/2\pi$. Таким образом, величина $h/2\pi$ в теории Бора выступила в виде кванта момента количества движения. Второй постулат определяет частоту излученного атомом света через разность энергетических уровней.

Развитая Бором теория позволила объяснить не только загадку устойчивости атома, но и закономерности в спектре атома водорода, найденные ранее экспериментально. Существование стационарных состояний атома вскоре было показано опытным путем Франком и Герцем.

Рассмотренные противоречия между классической теорией и опытом в явлениях атомного масштаба убедительно свидетельствовали о большой эвристической ценности квантовой теории. И все же мнения физиков того времени о значении планковских идей не были единодушными. Сам Планк следующим образом оценивал тогда квантовую теорию: «Несмотря на удовлетворительное согласие ... результатов между собой и с опытными данными, идеи, из которых они возникли, хотя и возбуждают очень большой интерес, но, насколько я могу судить, еще отнюдь не нашли себе всеобщего признания. Это связано с тем, что квантовая гипотеза еще до сих пор не достигла

удовлетворительного завершения. В то время как многие физики из консерватизма отвергают развитые мною соображения или занимают выжидательную позицию, другие авторы, напротив, считают необходимым дополнить мои соображения еще более радикальными предположениями»¹⁾).

Лишь немногие физики сразу поняли огромную плодотворность новых воззрений, что квантовая теория — это именно та теория, которой суждено будет разрешить все трудности классической физики и которая является ключом к познанию тайн микромира. Уже в 1911 г. вопросы квантовой теории стояли в центре внимания участников первого Сольвеевского конгресса, специально созванного для обсуждения различных аспектов этой теории.

Великое открытие Планка показало, что энергия обладает совершенно новым качеством, не известным классической физике, — дискретностью. В свете квантовой теории выявились специфические особенности энергетических процессов, протекающих в масштабе микромира. В этом большая заслуга квантовой теории в развитии законов сохранения.

Специфические закономерности микропроцессов

Современная физика микромира явилась развитием квантовой теории Планка. В этом развитии идея сохранения играла далеко не последнюю роль. Напомним основные этапы этого процесса после исследований Н. Бора (1913 г.). Вскоре после своего возникновения квантовая теория разрешила фундаментальные противоречия классической физики с опытными фактами. Бор устранил одно из таких противоречий, введя в классическую электродинамику и механику квантовые постулаты. Плодотворность боровской концепции быстро стала совершенно очевидной. Однако при этом и в тех проблемах, которые разрешила теория Бора, возникли существенные трудности. Они были вызваны непоследовательностью самой теории. Квантовые условия Бора были совершенно чужды классической электродинамике и механике. Они фигу-

¹⁾ Сб. «Макс Планк», Изд-во АН СССР, М., 1958, стр. 160.

рировали в этих теориях не органически, а как нечто привходящее, внутренне не связанное с классическими теориями. Вторым недостатком теории Бора была непоследовательность в приложении к электродинамике. Считая последнюю неприменимой к расчету движений электронов в атомах, Бор, однако, использовал ее законы для расчета интенсивности и поляризации излучения (спектральных линий). Для этой цели им был сформулирован так называемый принцип соответствия — положение о совпадении результатов квантовой и классической теорий в области больших квантовых чисел. С существенными трудностями теория Бора столкнулась при попытках рассчитать движение электронов в атомах более сложных, чем атом водорода (в частности, в атоме гелия).

Все эти факты показывали, что теория Бора внутренне противоречива, что она представляет лишь механическое соединение классических теорий с квантовыми представлениями, а потому нуждается в коренной переработке. В течение ближайших десяти лет, вплоть до 1924 г., рядом ученых делались различные попытки более глубокого синтеза классических и квантовых идей, с тем чтобы придать теории Бора логическую непротиворечивость. Но все эти попытки не приводили к решающему успеху. Становилось очевидным, что теория Бора, даже дополненная и усовершенствованная, не в состоянии логически последовательно до конца решить ни одной задачи атомной физики. Поиски непротиворечивой общей теории атомных процессов необходимо было искать в ином направлении.

Первым фундаментальным и имевшим далеко идущие последствия шагом явилась работа французского теоретика Луи де Бройля. Его докторская диссертация в 1924 г. положила начало созданию новой общей теории микромира — квантовой (волновой) механики. В основу идеи де Бройля была положена установленная еще в 1834 г. Гамильтоном оптико-механическая аналогия, т. е. аналогия между классической механикой и геометрической оптикой. Сущность ее заключалась в том, что траектория частицы с массой m и энергией E , движущейся в постоянном потенциальном поле $\Phi(x, y, z)$, аналогична траектории световых

лучей в среде с показателем преломления $n(x, y, z)$. Эта аналогия находит свое выражение и в соответствующих дифференциальных уравнениях, описывающих движение частицы и распространение световой волны. При этом показатель преломления n оказывается пропорциональным $\sqrt{2m(E - \Phi)}$.

Французский физик увидел в этой аналогии не только формальное сходство в математическом описании законов движения волн и материальных частиц, но и глубокий физический смысл. Он пришел к заключению, что законы движения микрочастиц должны быть таковы, чтобы уравнения, их описывающие, отражали двойственную природу этих частиц — волновую и корпускулярную, ибо такой дуализм органически присущ всем без исключения частицам атомного масштаба. Примером этому является квант света — фотон, который проявляет себя и как частица, и как волна.

Вспоминая несколько лет спустя развитие своих идей, де Бройль писал: «Волновая механика родилась в результате усилия, направленного к тому, чтобы понять подлинную природу дуализма волн и корпускул, совершенно определенно проявившегося экспериментально, но оставшегося непонятым теоретически в фотоэффекте и в интерпретации его Эйнштейном. Размышляя над этим вопросом, я пришел к мысли, что дуализм волн и корпускул является, по-видимому, всеобщим и что не должно быть никакой существенной разницы, по крайней мере с этой точки зрения, между фотонами и другими корпускулами. Короче говоря, моя отправная идея состояла в том, чтобы ассоциировать распространение волны с движением всякой корпускулы; я надеялся, таким образом, что, ассоциируя волну с движением электрона, мне удастся интерпретировать квантовые условия, которые в атомной теории Бора определяли возможность движения электронов в атомах. Действительно, в этих условиях появляются целые числа (квантовые числа. — Я. Г.), аналогичные тем, которые в волновых теориях появляются в условиях интерференции и резонанса»¹⁾.

¹⁾ Л. де Бройль, Введение в волновую механику, Харьков, 1932, стр. 8.

Основываясь на этих идеях и соображениях теории относительности, де Бройль распространил соотношения между энергией и импульсом, частотой и длиной волны для фотона на движение любой микрочастицы. Если E и p — соответственно энергия и импульс частицы, а ν и λ — частота и длина волны, то они связаны следующим образом:

$$E = h\nu, \quad p = \frac{h}{\lambda}.$$

Идея де Бройля была столь оригинальной и необычной, что даже крупнейшие физики отказывались верить в нее. А. Ф. Иоффе вспоминает в своих «Встречах с физиками», что когда в 1924 г. учитель де Бройля Ланжевен познакомился с содержанием диссертации своего ученика, то хотя он и «восхищался остроумием и оригинальностью идей де Бройля», но не «верил тогда в их реальность»¹⁾. Однако вскоре идея де Бройля была подтверждена рядом ученых в опытах по дифракции электронов (К. Дэвиссон, П. С. Тартаковский и др.). Эти опыты были осуществлены в 1927—1929 гг. Но еще раньше Шредингер положил представление о волновых свойствах микрочастиц в основу своей теории микрочастиц — волновой механики. За сравнительно короткий срок, в период с 1924 по 1930 г., — эта теория получила фундаментальные результаты как в принципиальных основах механики микромира, так и в решении конкретных задач физики атома.

По мере проникновения в глубь атома перед физиками раскрывалась удивительная картина микромира со своими специфическими закономерностями, не имеющими ничего общего с законами классической физики. Открытие сложного строения атомного ядра, открытие и исследование свойств так называемых «элементарных» частиц выявило еще более сложные и необычные закономерности. Отметим некоторые из них.

В отличие от классической механики, в которой траектория движущегося тела может быть указана

¹⁾ А. Ф. Иоффе, Встречи с физиками, Физматгиз, 1960, стр. 62.

совершенно точно, в квантовой механике можно говорить только о вероятности нахождения частицы, например электрона, в данном месте пространства. Эта вероятность равна $|\psi|^2 dV$, где $|\psi|$ — амплитуда волны, связанной с движением электрона. Сама же «волновая функция» зависит от пространственных координат и времени и может быть получена в результате решения волнового уравнения Шредингера.

Анализируя основные положения квантовой механики, В. Гейзенберг показал в 1927 г., что микромиру присущ специфический закон, получивший наименование «принципа неопределенностей» (в нашей отечественной физической и философской литературе принят термин «соотношение неопределенностей», как лучше отвечающий физическому и философскому содержанию этого закона)¹⁾.

Соотношение неопределенностей утверждает, что не существуют такие состояния физической системы, в которых две динамические переменные (например, координата q и импульс p , энергия E и время t) имеют вполне определенные значения, если эти переменные канонически сопряжены в соответствии с требованиями уравнений Гамильтона. Это означает, что одновременное точное определение (измерение) таких величин принципиально невозможно. Таким образом, возникает определенная квантовомеханическая граница точности одновременного измерения указанных пар величин. Количественным выражением соотношения неопределенностей для пар координата — импульс и энергия — время являются следующие неравенства Гейзенберга:

$$\Delta p \Delta q \geq \frac{\hbar}{2\pi}, \quad \Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2\pi},$$

где \hbar — постоянная Планка.

«Неравенства Гейзенберга... указывают пределы применимости классического способа описания. Но они отнюдь не ставят каких-либо границ для более совершенных способов описания физических явлений и для более полного познания свойств физических

¹⁾ Подробнее см. Д. Бом, Квантовая теория, Физматгиз, 1961, стр. 124 и сл.

объектов»¹⁾). Приведенное замечание академика В. А. Фока подчеркивает большую эвристическую ценность соотношения неопределенностей, его философское значение. Важно еще раз указать, что соотношение неопределенностей не связано с несовершенством измерительной техники, а выражает объективные закономерности микромира. Оно является следствием открытого де Бройлем корпускулярно-волнового дуализма материи.

Для нас важно то, что соотношения Гейзенберга содержат сохраняющиеся величины — энергию и импульс. С этим связаны некоторые особенности применения классических законов сохранения в микромире.

Понятия энергии и импульса в микромире

Квантовый характер микропроцессов означает, в частности, что момент импульса и сам импульс в них могут принимать только дискретные значения. В отношении энергии, как говорилось выше, это было показано еще Планком. Предположение о квантовании момента количества движения было впервые выдвинуто Бором в качестве постулата и с успехом применено им при расчете энергетических уровней атома водорода в 1913 г. Импульс микрочастиц может принимать только дискретные значения: например, квант электромагнитного поля — фотон частоты ν — обладает импульсом $h\nu/c$, где h — постоянная Планка, а c — скорость света. Обмен импульсами происходит во многих явлениях микромира — в эффекте Комптона (см. дальше), при рассеянии γ -квантов на электронах и в других.

Между энергией и импульсом в классической и квантовой механике есть существенная разница. Движение объектов в классической механике можно описывать с помощью их траектории, пользуясь понятиями координат и времени. В качестве интегралов дифференциальных уравнений движения тогда получаются три классических закона сохранения — энергии, импульса и момента количества движения. Сами эти

¹⁾ В. А. Фока, Квантовая физика и строение материи, Изд-во ЛГУ, 1965, стр. 10—11.

величины выступают здесь как определенные комбинации координат и их производных по времени (скоростей). Последнее означает, что в принципе, если ограничить задачу лишь описанием механического движения, можно было бы обойтись без этих величин. Правда, вряд ли можно согласиться с высказыванием Бом, что «в классической теории с логической точки зрения не является абсолютно необходимым считать энергию и импульс фундаментальными свойствами материи» и что введение этих понятий — «лишь удобный и соблазнительный способ описания, основанный на законах сохранения этих величин»¹⁾).

В квантовой механике энергия и импульс сохраняют свое фундаментальное значение. Но специфические свойства микромира, выражаемые, в частности, соотношением неопределенностей Гейзенберга, приводят к тому, что здесь энергию и импульс уже нельзя представлять как функцию координат и скоростей, и эти величины приобретают самостоятельное значение. Законы их сохранения уже не являются следствием динамического уравнения движения микрообъектов (уравнения Шредингера), а их следует рассматривать непосредственно как следствие симметрии пространства и времени. Поэтому в микромире связь сохраняющихся величин со свойствами пространства и времени проявляется в гораздо более общем виде, чем в классической физике. Изменяется и само определение энергии и импульса. А именно, в соответствии с теорией де Бройля энергия определяется как $h\nu$, а импульс как h/λ .

Говоря об этой особенности определения энергии и импульса в микромире, Бом приходит к заключению, что импульс — это «независимое физическое свойство вещества, которое в классическом пределе определяет потенциальную способность создавать количество движения, или, в более общей формулировке, — это величина, однозначно связанная с длиной волны де Бройля и статистически с пространственно-временным движением материи. Следовательно, когда мы говорим, что электрон обладает определенным импульсом, то это утверждение имеет такое же значение,

¹⁾ Д. Бом, Квантовая теория, Физматгиз, 1961, стр. 188.

как и утверждение, что он занимает данное положение. Поэтому мы должны считать, что импульс и энергия — это свойства, присущие материи, свойства, которые не могут быть непосредственно представлены, но которым просто даны названия *импульс* и *энергия*»¹⁾.

Весьма интересно замечание Бом относительно трактовки импульса как первопричины движения материи. В классической физике причиной изменения скорости тел является сила. При этом, если силы заданы как функции времени и известны начальные условия движения (начальные координаты и скорости), то дальнейший ход движения в принципе определен для любых моментов времени. В микромире нет непосредственной связи между силой и волновыми свойствами материи. Именно здесь и выявляется фундаментальная роль импульса, который статистически определяет лишь среднее расстояние, проходимое частицей за данное время. «Таким образом, — пишет Бом, — мы должны рассматривать импульс как прямую причину движения материи, а не следовать классическому определению и считать силу причиной изменения движения. Если система предоставлена самой себе, то она, как и в классической теории, претерпевает некоторый характеристический тип движения, с тем лишь исключением, что в квантовой теории ход этого движения определяется лишь статистически импульсами всех влияющих на движение частиц. Следовательно, соответствующие энергии и импульсы являются причинными факторами, присущими веществу. Они контролируют связь между разновременными событиями динамически в классической механике и статистически в квантовой»²⁾.

Важной особенностью микромира является кажущееся несоблюдение закона сохранения энергии в так называемых виртуальных процессах. В квантовой механике существует метод приближенного рассмотрения состояний и процессов, основанный на том, что данное состояние представляется как результат наложения (суперпозиции) различных возможных состояний

¹⁾ Д. Бом, Квантовая теория, стр. 189.

²⁾ Там же, стр. 190—191.

сходной, но более простой системы. В соответствии с этим и изменение системы во времени представляется как переход из одного возможного (виртуального) состояния в другое. Поскольку виртуальное состояние является лишь одним из возможных, то, естественно, оно не может точно совпадать с реальным состоянием системы. В частности, энергия виртуального состояния может не совпадать с энергией реальной системы. Могут также не совпадать и значения энергий виртуальных состояний. Это обстоятельство и приводит к кажущимся нарушениям закона сохранения энергии, хотя при этом другие законы сохранения выполняются. Это нарушение является следствием соотношения неопределенностей для энергии и времени. Так как реальный процесс представляется совокупностью виртуальных переходов, каждый из которых совершается в произвольно малый промежуток времени Δt , то это приводит к тому, что фиксация точного значения энергии исключается. Ее можно фиксировать лишь с точностью до величин, не меньших чем $\frac{h}{2\pi \cdot \Delta t}$ (так как $\Delta E \Delta t \geq h/2\pi$).

Незнание физиками этих тонкостей микропроцессов в начальный период их изучения в некоторых случаях приводило к попыткам отказа от закона сохранения энергии при трактовке тех или иных явлений.

Классические законы сохранения в микромире

Нужно сказать, что подобного рода сомнения в справедливости закона сохранения энергии ведут свое начало с революционных физических открытий на рубеже нашего века. Конец XIX и первые годы XX в. ознаменовались открытиями, которые были охарактеризованы В. И. Лениным как «революция в физике». Открытие радиоактивности, исследование свойств электрона, пересмотр представлений о пространстве и времени, гипотеза квантов, создание первых моделей атома — все это вызвало ломку привычных классических представлений, которая сопровождалась ожесточенной борьбой материализма и идеализма. Часть физиков стала на путь отрицания объективности законов и принципов физики. Создавшееся положение

В. И. Ленин оценил как кризис физики: «Суть кризиса современной физики состоит в ломке старых законов и основных принципов, в отбрасывании объективной реальности вне сознания, т. е. в замене материализма идеализмом и агностицизмом»¹⁾).

Естественно, такая ситуация не могла не затронуть и законы сохранения. Первые сомнения относительно выполнения закона сохранения энергии были высказаны еще в 1896 г. в связи с открытием явления радиоактивности. Радий и другие радиоактивные элементы непрерывно выделяют энергию в виде радиоактивного излучения. Было замечено, что температура препаратов радия всегда несколько выше температуры окружающей среды. Напрашивался вывод, что при радиоактивных процессах происходит творение энергии «из ничего», и, следовательно, здесь закон сохранения энергии не выполняется. Именно на такой путь отрицания великого закона природы стал А. Пуанкаре, заявивший в одной из своих работ, что радий «подрывает принцип сохранения энергии». Однако эта первая попытка атаки на закон сохранения энергии успехом не увенчалась. В 1902 г. Резерфорд и Содди показали, что при радиоактивных процессах происходит самопроизвольный распад атомов элементов, сопровождающийся, с одной стороны, превращением радиоактивных элементов, а с другой — высвобождением большого количества заключенной в атоме энергии. Таким образом, источник энергии был найден.

В последующие годы также было сделано немало попыток доказать невыполнение закона сохранения и превращения энергии в микропроцессах. В одних случаях это была просто попытка спасти теорию, казавшуюся непротиворечивой и законченной, в других — результат незнания некоторых опытных фактов, в третьих — просто ошибки экспериментов. Все эти попытки к цели не приводили; успешное разрешение трудностей явилось отнюдь не результатом отказа от закона сохранения, а напротив, результатом его признания. При этом лишний раз выявлялось большое методологическое и эвристическое значение законов сохранения. Поэтому уже вскоре Люсьен Пуанкаре

¹⁾ В. И. Ленин, Собр. соч., изд. 4, т. 14, стр. 245.

должен был признать, что «радий и его свойства не могут доставить ни одного серьезного аргумента против принципа сохранения энергии»¹⁾).

Рассмотрим две попытки решения затруднений физики микромира путем отказа от закона сохранения и превращения энергии. Уже говорилось о тех трудностях, с которыми столкнулась теория Бора на первых порах своего существования. Одна из наиболее фундаментальных ее трудностей состояла в невозможности объяснить процессы интерференции и дифракции. Согласно волновой теории электромагнитная энергия непрерывно переносится волнами, в то время как согласно квантовым представлениям процессы лучеиспускания и лучепоглощения имеют дискретный характер. Следовательно, основной боровский постулат, определяющий механизм излучения энергии атомом, не мог быть приведен в соответствие с волновым аспектом.

Это обстоятельство побудило Бора совместно с Г. Крамерсом и Дж. Слестером выдвинуть гипотезу, согласно которой элементарные акты лучеиспускания и лучепоглощения должны рассматриваться как совершенно независимые, причем в каждом таком акте допускалась возможность нарушения закона сохранения энергии; последний выполнялся лишь статистически, т. е. в среднем для большого числа элементарных актов²⁾).

Однако, как и следовало ожидать, попытки решения принципиальных трудностей боровской теории атома путем статистической трактовки закона сохранения и превращения энергии не увенчались успехом. Подавляющее большинство физиков не могло примириться с точкой зрения авторов гипотезы. Р. Крониг в своих воспоминаниях о пребывании в Копенгагене у Бора в этот период характеризует сложившуюся там обстановку следующим образом: «В институте Бора происходили новые и захватывающие события. За год до этого (1924 г.) Бор, Крамерс и Слестер опубликовали статью, в которой рассматривалась радикальная

¹⁾ Л. Пуанкаре, Эволюция современной физики, СПб., 1910, стр. 160.

²⁾ N. Bohr, H. Kramers, J. Slater, Zeitschrift für Physik, Bd. 24, S. 69, 1924.

возможность того, что в элементарных процессах испускания и поглощения излучения энергия и импульс сохраняются только статистически. Это экстремистское мнение вызвало, естественно, большие споры, которые затихли только после того, как Гейгер и Боте экспериментально доказали, что природа не использует эту возможность»¹⁾).

А вот что писал Паули: «Если закон сохранения энергии несправедлив, то весьма трудно понять вообще, почему бы ему в этом случае все же выполняться статистически»²⁾).

За год до появления гипотезы Бора, Крамерса и Слетера американский физик А. Комптон, изучая корпускулярные свойства света, сделал очень важное для утверждения классических законов сохранения в микромире открытие, получившее в дальнейшем название эффекта Комптона. Как мы помним, уже квантовая трактовка фотоэффекта, данная Эйнштейном, предполагала выполнение закона сохранения энергии при столкновении фотона с электроном в металле. Уравнение фотоэффекта, данное Эйнштейном, многократно проверялось опытным путем и всегда подтверждалось. Квантовая теория света очень просто и наглядно объясняла световое давление, причем теоретически приводила к тому же результату, что и волновая теория Максвелла. Рассмотрим этот вопрос несколько подробнее. Пусть на 1 см^2 абсолютно поглощающей поверхности за 1 сек падает n световых квантов, несущих общую энергию $n h \nu$. С другой стороны, поток их электромагнитной энергии равен ωc , где ω — плотность энергии. Приравнявая оба выражения, будем иметь $\omega = n \frac{h \nu}{c}$. Величина $\frac{h \nu}{c} = p$ представляет собой импульс отдельного фотона. Таким образом, полный импульс np , передаваемый фотонами поглощающей поверхности (и проявляющий себя как световое давление), численно равен плотности

¹⁾ Р. Крониг, Переломные годы. В сб. «Теоретическая физика 20 века», ИЛ, 1962, стр. 33.

²⁾ В. Паули, Законы сохранения в теории относительности и квантовой механике. В сб. «Современные проблемы физико-химии», Изд-во МГУ, 1938, стр. 29.

энергии светового потока, как и в теории Максвелла.

Однако совпадение результатов волновой и квантовой теорий будет иметь место лишь до определенного предела — пока световой поток обладает достаточной интенсивностью, т. е., согласно квантовой теории, состоит из большого числа фотонов. При небольших интенсивностях можно было ожидать, что должны проявиться отдельные толчки фотонов о поверхность. Учитывая малую энергию фотонов видимого света и большую массу тела, на которое они падают, вероятность наблюдать подобный эффект практически равна нулю. Если же использовать фотоны большой энергии (например, жесткие рентгеновские лучи или гамма-лучи), а в качестве облучаемого объекта отдельные электроны, то картина будет иной. В этом случае при взаимодействии фотона со слабо связанным или свободным электроном должно наблюдаться явление, аналогичное, например, удару бильярдных шаров: электрон, получив «удар» фотона и приобретя таким образом некоторую энергию и импульс, будет отброшен. Следовательно, каждый элементарный акт рассеяния должен сопровождаться появлением электронов отдачи. Подобно тому как упругий удар шаров рассчитывается по законам сохранения энергии и импульса, можно было ожидать, что «упругое» взаимодействие фотона и электрона также должно удовлетворять этим двум законам сохранения.

Следует сказать, что явление рассеяния света довольно подробно было изучено Рэлеем, Дж. Томсоном и другими физиками, которые получили важные результаты, согласующиеся с опытными данными. При этом классическая электронная теория, на основе которой производился расчет явления, приводила к результату, что частоты рассеянных и первичных лучей должны быть одинаковыми, так как рассеяние объяснялось как результат вынужденных колебаний электронов в электромагнитном поле световой волны. Между тем при рассеянии рентгеновских и гамма-лучей в составе рассеянного излучения появляются волны с частотами, отличными от частоты первичного излучения. Появление этих побочных частот приписывалось неучтенным вторичным факторам.

В период 1922—1923 гг. Комптон тщательно изучил явление рассеяния рентгеновских лучей и показал, что появление в рассеянном излучении побочных частот обусловлено отнюдь не влиянием неучтенных факторов, а непосредственно связано с механизмом самого явления рассеяния. От рентгеновской трубки жесткие лучи направлялись на графитовый блок, пройдя предварительно свинцовую диафрагму, которая выделяла узкий пучок этих лучей. Рассеянные лучи попадали в рентгеновский спектрограф. Спектральное распределение интенсивности измерялось ионизационной камерой. Спектрометр позволял менять угол наблюдения (между рассеянным излучением и первичным пучком). Измерения привели Комптона к следующим выводам: 1) в рассеянном излучении наряду с первоначальной частотой присутствует также излучение с меньшей частотой; 2) изменение этой частоты растет с увеличением угла рассеяния; 3) с возрастанием угла рассеяния интенсивность основной (несмещенной) линии уменьшается, а интенсивность смещенной линии увеличивается. Возникновение побочной линии с меньшей частотой (большей длиной волны) в рассеянном рентгеновском излучении и получило наименование эффекта Комптона.

Попытка объяснения эффекта Комптона на основе классической теории успеха не имела. Более того, она приводила к противоречию с законами сохранения. Между тем это объяснение легко и просто получается на основе квантовой теории. При этом, в отличие от классической теории, требующей, чтобы в рассеянии принимали участие все электроны, квантовая теория считает, что рассеяние обусловлено участием незначительного числа электронов, но каждый из них рассеивает один фотон. Естественно при этом считать, что каждый фотон обладает определенной энергией $h\nu$ и импульсом $h\nu/c$. Рассеяние фотонов электронами тогда связано с обменом энергией и количеством движения при соударениях между ними. При столкновении фотона со слабо связанным электроном (например, периферийным электроном атома) фотон передаст последнему часть своей энергии и импульса. «Отскочивший» (рассеянный) фотон будет иметь меньшую энергию, а следовательно, и меньшую частоту.

Так появится смещенная линия. Но наряду с этим происходит и столкновение фотона с атомом в целом. Так как масса последнего значительно больше массы фотона, то по законам сохранения импульса и энергии фотон практически не передаст атому никакой энергии (и импульса). Следовательно, фотон просто «отразится», сохранив свою энергию неизменной. В результате наряду со смещенной линией будет присутствовать и несмещенная, основная линия. Аналогичные соображения объясняют, почему эффект Комптона не наблюдается в видимой части спектра.

Количественная картина эффекта Комптона получается на основе законов сохранения импульса и энергии. Пусть первичный фотон обладает энергией $h\nu$, а рассеянный $h\nu'$. Полная энергия электрона до соударения m_0c^2 , а после соударения mc^2 , где $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$

(u — скорость, полученная электроном, который до соударения считался неподвижным). Тогда, согласно закону сохранения энергии, можно написать:

$$h\nu + m_0c^2 = h\nu' + mc^2.$$

С другой стороны, закон сохранения импульса дает

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}' + m\mathbf{u},$$

где $|\mathbf{p}| = h\nu/c$, $|\mathbf{p}'| = h\nu'/c$. Решая оба уравнения совместно, получим для величины $\Delta\lambda$ сдвига линии по длине волны

$$\lambda' - \lambda = \Delta\lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos \varphi).$$

Константа $\Delta = h/m_0c$ называется комптоновской длиной волны. Это соотношение объясняет зависимость смещения от угла рассеяния φ .

Мы так подробно остановились на эффекте Комптона потому, что это было, пожалуй, первое явление микромира, которое совершенно однозначно ответило на вопрос, применимы ли классические законы сохранения к микромиру. Убедительное совпадение теоретических выводов с данными экспериментов никаких сомнений на этот счет не оставило: классические законы сохранения энергии и импульса действуют в микромире столь же непогрешимо, как и в макромире.

Явление Комптона позволило также опровергнуть гипотезу Бора, Крамерса и Слетера относительно статистического выполнения закона сохранения энергии в микроявлениях. Действительно, из гипотезы Бора следовало, что рассеяние фотонов и появление электронов отдачи — это два процесса, не связанных между собой. Поэтому число как тех, так и других частиц будет одинаковым лишь в среднем за сравнительно большой промежуток времени. Следовательно, и баланс энергии должен выполняться не в каждом элементарном акте рассеяния, а статистически, за тот же промежуток времени.

Эффект Комптона показал выполнение законов сохранения в каждом отдельном акте рассеяния. Теперь, чтобы все сомнения на этот счет исчезли, оставалось доказать, что рассеянный фотон и электрон отдачи всегда появляются одновременно. Опыты Боте и Гейгера и были поставлены для обоснования этого факта (позже Комптон, Саймон и другие физики усовершенствовали методику этих экспериментов). Между двумя счетчиками Гейгера пропускался пучок рентгеновских лучей. Левый счетчик фиксировал рассеянные фотоны, а правый — электроны отдачи. Первый был закрыт платиновой фольгой и наполнен водородом, а второй открыт. Опыт проводился в водородной атмосфере, так что открытый счетчик был также наполнен водородом. Водород был применен потому, что он слабо поглощает рентгеновское излучение и хорошо его рассеивает. При такой методике эксперимента счетчик фотонов не реагировал на электроны отдачи, поскольку они поглощались фольгой, но фиксировал фотоны, которые, пройдя фольгу, вырывали электроны из стенок камеры, молекул воздуха и из фольги. В свою очередь счетчик электронов отдачи не реагировал на фотоны, так как последние слабо поглощались водородом. Таким образом, если появление рассеянного фотона и электрона отдачи во времени совпадало, то оба счетчика должны были срабатывать одновременно. Практически это и наблюдали Боте и Гейгер.

В 1928 г. известный английский теоретик П. Дирак сделал существенный шаг в развитии квантовой

теории движения микрочастиц. Основное уравнение квантовой механики — уравнение Шредингера — имело существенный недостаток: оно не было инвариантным относительно преобразований Лоренца и, следовательно, не удовлетворяло требованиям теории относительности. Дирак получил квантовое уравнение движения электрона, обладающее нужным свойством. Однако при этом учет релятивистского соотношения между энергией и импульсом привел Дирака к неожиданным выводам. Выше уже записывалось это соотношение:

$$E = \pm \sqrt{c^2 p^2 + m_0^2 c^4},$$

или, при $p=0$, $E = \pm m_0 c^2$. Таким образом, теория приводила к существованию решения с отрицательным знаком энергии. Смысл этого решения оказался гораздо более глубоким, чем это могло показаться с первого взгляда.

Дирак предложил следующую интерпретацию полученного им результата. Электроны с отрицательной энергией $E < 0$ принципиально ненаблюдаемы и образуют равномерный «фон». Если из этого «фона» ненаблюдаемых электронов вырвать один электрон, сообщив ему положительную энергию $E > 0$, то на «фоне» возникнет «дырка» с $E > 0$ и зарядом, противоположным заряду электрона. Таким образом, свойства «дырки» будут соответствовать свойствам частицы с $E > 0$ и зарядом, противоположным заряду электрона. Эта гипотетическая частица, предсказанная Дираком, получила название позитрона. Импульсу и энергии позитрона соответствовали, таким образом, отрицательный импульс и отрицательная энергия «дырки». Так была открыта первая античастица, явившаяся неизбежным следствием релятивистской инвариантности квантовомеханической теории электрона.

Развитие идей Дирака в дальнейшем привело к формулировке принципа инвариантности относительно зарядового сопряжения, важнейшим следствием которого было заключение, что для каждой частицы существует зарядово-сопряженная частица, или античастица, имеющая ту же массу и тот же заряд, что и частица, но противоположный по знаку.

Мы видим, следовательно, что в предсказании существования античастиц большую роль сыграли идеи, основанные на законах сохранения. Более того, применение законов сохранения позволило теории Дирака предсказать весьма важные особенности в поведении позитронов. Положим, что электрон, находящийся в состоянии с отрицательной энергией, поглотит фотон. Если энергия фотона более $2m_0c^2$, то электрон покинет отрицательный энергетический уровень и перейдет на уровень с положительной энергией. В действительности такой переход может совершиться только в том случае, если, помимо закона сохранения энергии, будет еще удовлетворен и закон сохранения импульса. Здесь мыслимы следующие случаи: 1) Свободный электрон вообще не может поглотить энергию фотона полностью, так как вместе с фотоном должен исчезнуть и его импульс. Таким образом, для того чтобы одновременно выполнялись законы сохранения энергии и импульса, необходимо присутствие третьей частицы, например ядра какого-либо атома. 2) Если электрон связан, т. е. входит в состав атома, тогда поглощение фотона электроном становится возможным, и в результате рождается пара электрон — позитрон. Таким образом, теория Дирака приводит к заключению, что если электрон «фона» поглощает фотон с энергией, не меньшей $2m_0c^2$, и при этом вблизи него находится ядро атома, то результатом этого будет появление пары электрон — позитрон. Этот вывод теории был экспериментально подтвержден. Было показано, что действительно, для образования пар электрон — позитрон необходима энергия кванта больше $2m_0c^2 \approx 10^6$ эв. При этом образование пар происходит только при прохождении фотонов через вещества, ядра атомов в которых представляют «третьи» частицы.

Наряду с образованием пар возможен и обратный процесс превращения пары электрон — позитрон в фотон. И опять же законы сохранения лимитируют возможные «каналы» протекания этого процесса. Если поток позитронов направить на пластинку из металла, то она начнет испускать жесткие γ -лучи. Возникновение этих лучей является результатом соединения позитронов со свободными электронами металла. При

этом обе частицы, как правило, превращаются в два γ -кванта, которые обладают энергией, массой и импульсом, равным сумме таковых для электрона и позитрона перед их слиянием.

В соответствии с теорией Дирака этот процесс объясняется так: «дырка» на «фоне» ненаблюдаемых электронов с отрицательной энергией — позитрон — не может длительно существовать, она будет заполнена электроном с положительной энергией. «Дырка» исчезает, а вместе с нею и пара позитрон — электрон. Согласно закону сохранения энергии разность энергий положительного и отрицательного уровней выделится в виде γ -квантов. Процесс превращения пары позитрон — электрон в γ -кванты получил не совсем удачное название «аннигиляции», т. е. уничтожения частиц. На самом деле здесь происходит превращение одной формы материи — вещества (частиц, имеющих массу покоя) в качественно другую форму — полевою (фотонов, не имеющих массы покоя).

Превращение пары электрон — позитрон в γ -кванты происходит в строгом соответствии также с законом сохранения импульса. Это позволяет нам объяснить тот факт, что при «аннигиляции» образуются два γ -кванта. Действительно, при сближении электрона и позитрона с одинаковой скоростью относительно их центра инерции (центра масс) суммарный импульс пары равен нулю. Если после «аннигиляции» возник бы один γ -квант, то суммарный импульс не равнялся бы нулю и закон сохранения импульса был бы нарушен. Два же фотона одной частоты (энергии), разлетающиеся с одинаковой скоростью в противоположные стороны от места встречи позитрона и электрона, дают в сумме импульс, как раз равный нулю.

Следует отметить, что в редких случаях пара электрон — позитрон может «аннигилировать» и на три фотона. Это происходит потому, что, кроме законов сохранения энергии и импульса, при этом должен выполняться и закон сохранения момента количества движения. Дело в том, что электрон и позитрон при встрече до «аннигиляции» некоторое время вращаются вокруг общего центра инерции, образуя своеобразный комплекс — позитроний. В этом случае необходи-

мо учитывать также направления спинов электрона и позитрона¹⁾).

Рассмотренные особенности процесса «аннигиляции» были непосредственно подтверждены рядом экспериментов. Вместе с этим новое подтверждение получили и законы сохранения импульса, энергии и момента количества движения применительно к процессам микромира.

Выше было рассказано о попытке преодолеть трудности боровской теории путем отказа от закона сохранения энергии. Еще одна попытка подобного рода также принадлежала Бору и была связана с исследованием бета-распада радиоактивных веществ. Если механизм возникновения альфа- и гамма-излучения без особых трудностей был объяснен квантовой механикой, то испускание бета-частиц (электронов) оказалось одной из труднейших для понимания проблем ядерной физики. Действительно, при α -распаде ядро атома испускает α -частицу, представляющую собой ядро гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов. Таким образом, при α -распаде не образуется новых частиц, поскольку и протоны и нейтроны уже имелись в ядре. Был понят и процесс γ -излучения, при котором из ядра вылетала новая (не бывшая ранее в нем) частица — γ -квант (фотон). Он был связан с тем, что путем γ -радиоактивности ядро атома освобождалось от избыточной энергии аналогично тому, как рождался фотон в атоме при переходе электрона с верхней орбиты на нижнюю. Как α -, так и γ -радиоактивность протекала в полном соответствии с законом сохранения энергии, импульса и момента количества движения.

Что же касается бета-распада, то это явление оказалось значительно более сложным и поставило перед учеными ряд проблем. Прежде всего потому, что при этом виде радиоактивности из ядра вылетает ранее не находившаяся там бета-частица — электрон. Когда к этому явлению были применены законы сохранения, то выявилась совершенно необычная ситуация: энергия, импульс и момент количества движения началь-

¹⁾ Подробности см. в кн.: К. И. Щёлкин, Физика микромира, Атомиздат, М., 1965, стр. 83—84.

ного ядра не были равны энергии, импульсу и моменту количества движения продуктов распада вновь образовавшегося ядра и испущенного электрона. Баланс указанных величин не только почти никогда не сходиллся, но и каждый раз давал различную величину. Ядро одного и того же радиоактивного изотопа испускает электроны различной энергии, начиная от некоторой максимальной до нулевой. При этом оказывается, что образующееся конечное ядро имеет всегда одну и ту же энергию. Начальное же ядро, превращаясь в результате радиоактивного распада в новое ядро, теряет одну и ту же энергию, в точности равную максимально возможной энергии испущенного электрона. Возник, естественно, вопрос: куда девается энергия в тех случаях, когда энергия электрона меньше максимальной?

Это был отнюдь не единственный сюрприз, преподнесенный физикам β -радиоактивностью. Когда подсчитали импульс исходного ядра и его момент количества движения и сравнили с импульсом и моментом количества движения вновь образовавшегося ядра и электрона, то оказалось, что и здесь баланс не сходится. Таким образом, в процессе бета-распада как будто нарушались все три классических закона сохранения, между тем как во всех других известных явлениях микромира они неукоснительно соблюдались.

Бета-распад приводил к следующей ситуации: если α - и γ -распады подтверждали все прежние выводы физиков о ядре как о квантованной системе, то β -распад, при котором количество выделяемой энергии могло изменяться в широких пределах практически непрерывно, приводил, казалось бы, к противоположному выводу: ядро не является квантованной системой.

Для объяснения загадки бета-распада было предложено много гипотез, имеющих в настоящее время лишь исторический интерес. В 1922 г. Л. Мейтнер предположила, что бета-электроны растрачивают часть своей энергии внутри атома, когда пролетают через его электронную оболочку. Эта гипотеза подверглась строгой опытной проверке в 1927 г. Эллисом и Вустером. Опыт этих ученых состоял в следующем: радиоактивный препарат RaE в толстостенной свинцовой

оболочке помещался в медный калориметр. Количество энергии, выделенной препаратом за определенный промежуток времени, точно измерялось. Согласно гипотезе Мейтнер следовало ожидать, что средняя энергия, приходящаяся на один акт распада, должна была бы равняться максимальной энергии в бета-спектре. В действительности же эта энергия оказалась равной средней энергии, составляющей около одной трети от величины граничной энергии бета-частиц. Еще более тщательные опыты, осуществленные в 1930 г. самой Мейтнер совместно с Ортманом, подтвердили результат Эллиса и Вустера. Таким образом, вновь было установлено, что часть энергии ядерного превращения бесследно исчезает.

Неудача гипотезы Мейтнер и аналогичных допущений стимулировала появление гипотез, основанных на допущении, что недостающая энергия уносится при бета-распаде другой частицей, испускаемой ядром одновременно с электроном. При этом суммарная энергия двух частиц одинакова во всех элементарных актах распада, но по-разному распределяется между ними. В качестве такой второй частицы называли, например, фотон (гамма-квант). Однако при ближайшем рассмотрении и эти гипотезы оказались несостоятельными, так как, объясняя энергетический баланс, они противоречили другим фактам.

Единственным выходом из положения представлялось допущение о том, что в процессе бета-распада закон сохранения энергии нарушается. Именно такой выход и предложил Бор в 1930 г. Гипотеза Бора, как и рассмотренная выше, заключалась в предположении, что закон сохранения энергии нарушается в элементарных актах бета-распада, но выполняется статистически для достаточно большого числа таких актов. Во имя решения одной проблемы Бор предлагал столь большую жертву, что если бы она оправдалась, то это означало бы по существу крушение не только физики, но и всего естествознания в целом. Ибо с момента признания закона сохранения и превращения энергии как основы физического естествознания науке не был известен ни один факт, который противоречил бы этому закону. После описанных выше исследований Комптона и других физиков не было

сомнений в выполнении этого закона и в области микромира.

Гипотеза Бора о статистическом выполнении закона сохранения энергии в бета-распаде была опровергнута в 1933 г. опытами Эллиса и Мотта, исследовавших радиоактивный распад ThC . Если бы допущение Бора было правильным, то энергия бета-распада измерялась бы средней энергией электронов, в то время как в соответствии с опытами Эллиса и Мотта она измеряется максимальной энергией электронов.

Гипотеза Бора сразу же после появления встретила дружные возражения физиков. Уж слишком велика была жертва. Один из основоположников современной теории бета-распада швейцарский физик В. Паули писал по этому поводу: «На мой взгляд, эта гипотеза не только неудовлетворительна, но даже недопустима. Прежде всего, в этих процессах электрический заряд сохраняется, а я не вижу оснований считать сохранение заряда более фундаментальным, чем сохранение энергии и импульса. Далее, многие характерные особенности β -спектров... определяются именно энергетическими соотношениями. Если бы законы сохранения нарушались, то из этих соотношений пришлось бы сделать вывод, что β -распад всегда сопровождается потерей энергии и никогда — ее выигрышем; этот вывод предполагает необратимость процесса во времени, что, по-моему, совсем неприемлемо»¹⁾.

В 1931 г. на физической конференции в Пасадене Паули доложил ученым о своей интерпретации бета-распада: «Законы сохранения выполняются, так как испускание β -частиц сопровождается проникающей радиацией из нейтральных частиц... Сумма энергий β -частицы и нейтральной частицы..., испущенных ядром в отдельном акте, равна энергии, соответствующей верхней границе β -спектра. Само собой разумеется, что мы допускаем во всех элементарных процессах не только сохранение энергии, но и сохранение импульса и момента количества движения»²⁾.

Поскольку в результате бета-распада заряд ядра изменяется на единицу, предполагаемая частица долж-

¹⁾ Сб. «Теоретическая физика 20 века», ИЛ, М., 1962, стр. 393.

²⁾ Там же, стр. 394.

на быть электрически нейтральной. Такой частицей мог бы быть и фотон, но эту возможность отрицал опыт Эллиса и Вустера. Масса ядра при бета-распаде практически не изменяется, и поэтому частица должна была обладать ничтожно малой массой. Таким образом, постулированная Паули частица по своим свойствам отличалась от известных в то время частиц. Позже она была названа нейтрино. Введение этой гипотетической частицы объясняло парадоксы бета-распада. Указанные свойства нейтрино приводили к тому, что оно совершенно свободно проходило сквозь стенки приборов, не испытывая электромагнитных взаимодействий, и поэтому уносимая им энергия не могла быть, естественно, учтена.

Гипотеза нейтрино позволила также отстоять и закон сохранения момента количества движения в ядре. Трудности с этим законом возникли в 1932 г., когда В. Гейзенбергом и Д. Иваненко была предложена нейтронно-протонная схема строения атомов ядра. Согласно этой схеме электронов в ядре быть не должно, они рождаются в процессе бета-распада. Теория ядра приводила к заключению, что спин исходного ядра в единицах $\hbar/2\pi$ должен выражаться целым числом. Между тем спин электрона равен половине, а орбитальный момент количества движения электрона мог быть только целым числом $\hbar/2\pi$. Поэтому получалось, что в результате бета-распада целый спин ядра должен был бы переходить в полуцелый и наоборот. Это означало нарушение закона сохранения момента количества движения. Эта трудность сейчас же устранялась, если нейтрино приписать полуцелый спин ($1/2$).

Таким образом, согласно гипотезе Паули нейтрино явилось той частицей, которая компенсировала как недостающую энергию, так и спин. В дальнейшем был уточнен и закон сохранения импульса на основе допущения, что импульс ядра отдачи должен быть равен по величине и направлен противоположно суммарному импульсу электрона и нейтрино.

В одном из своих более поздних выступлений Паули подчеркнул, что он всегда был против того, чтобы решать какие бы то ни было трудности в физических проблемах путем отказа от закона сохранения энергии:

«Во-первых, я считаю, что аналогия между законами сохранения энергии и сохранения электрического заряда имеет глубокое значение и может являться надежной руководящей нитью. Вряд ли можно, отказавшись от закона сохранения энергии, сохранить закон сохранения электрического заряда, а этот последний закон никогда еще не приводил ни к каким затруднениям. Поэтому я с самого начала отказывался верить в нарушение сохранения энергии... ..Дальнейшие эксперименты по бета-распаду привели меня к гипотезе, согласно которой в каждом акте бета-распада из ядра одновременно с электроном вылетает еще некоторая другая частица, уносящая с собой разницу между энергией, теряемой ядром, и энергией бета-электрона. Частица эта должна обладать чрезвычайно большой проникающей способностью, чем объяснялось бы то, что она пока не была обнаружена на опыте. Эта гипотеза была впервые изложена мной в 1931 г. в лекциях, которые я читал тогда в Калифорнийском университете. Однако опубликовать ее тогда в печати я не решился»¹⁾.

Гипотеза Паули о нейтрино была изложена впервые в печати с его разрешения двумя участниками семинара Карлсоном и Оппенгеймером в 1932 г., а год спустя автор ее, выступая на седьмом Сольвеевском конгрессе, посвященном теме «Строение и свойства атомных ядер», обстоятельно доложил участникам конгресса о тех предпосылках, которые привели его к столь необычной гипотезе²⁾.

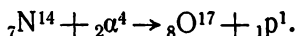
В 1934 г. итальянский физик Э. Ферми на основе гипотезы о нейтрино и протонно-нейтронной схемы строения атомного ядра создал теорию бета-распада, которая успешно объяснила все основные черты этого процесса. В последующие годы много усилий было затрачено на экспериментальное доказательство существования нейтрино. Сначала эти доказательства были получены косвенно, а в период 1953—1955 гг. путем постановки довольно сложных экспериментов американские физики Коуэн и Рейнес обнаружили нейтрино в свободном состоянии.

¹⁾ В. Паули, Законы сохранения в теории относительности и квантовой механике, стр. 32.

²⁾ См. сб.: «Теоретическая физика 20 века», стр. 389.

Роль нейтрино в ядерных процессах чрезвычайно велика. Особенно это стало ясно после знаменитых работ Ли, Янга и Ву, которые тесно связаны с законами сохранения и будут рассмотрены в одном из следующих разделов.

Решение проблемы бета-распада окончательно убедило физиков в том, что классические законы сохранения энергии, импульса и момента количества движения выполняются столь же неукоснительно в микромире, как и в макромире. Что касается других двух законов сохранения — массы и электрического заряда, то их выполнение в микромире не вызывало сомнений уже начиная с 1919 г., когда Резерфорд произвел первое искусственное расщепление атомного ядра азота, бомбардируя его альфа-частицами. Эта ядерная реакция имела следующий вид:



Сравнивая сумму массовых чисел и зарядов слева и справа, мы видим, что они одинаковы. Все ядерные реакции удовлетворяют этим двум законам сохранения.

Следует отметить, что в процессах аннигиляции частиц и античастиц соблюдается закон сохранения массы в его расширенной, релятивистской трактовке, поскольку здесь мы сталкиваемся с более сложным случаем превращения материи — из формы вещества в форму поля (и обратно), в то время как в обычных ядерных реакциях происходит превращение частиц в частицы (вещества в вещество). Подчеркнем еще раз, что расщепление ядер под действием различных частиц протекает также с соблюдением и закона сохранения энергии, и закона сохранения импульса.

Специфические законы сохранения и симметрия в микромире

Квантовая механика вскрыла специфические закономерности движения и превращения так называемых элементарных частиц. Эти закономерности не сводятся к закономерностям классической механики, и поэтому естественно ожидать, что в микромире наряду с классическими законами сохранения должны действовать

свои законы сохранения. Открытие этих законов связано с развитием наших знаний о свойствах элементарных частиц, хотя по существу с проявлением некоторых из специфических законов сохранения микромира физики столкнулись еще до создания квантовой механики. Так, в 1924 г. Лапортом было открыто эмпирическое правило, согласно которому испускание или поглощение фотона атомом всегда приводит к тому, что четный уровень энергии атома переходит в нечетный и наоборот. Если приписать четным уровням четность $+1$, нечетным — четность -1 , а фотону — «собственную» четность -1 , то правило Лапорта устанавливало «сохранение четности» при подобных переходах: в атомных процессах, сопровождающихся испусканием фотонов, четность начального состояния совпадает с полной четностью конечного состояния. При этом последняя определяется как произведение четности энергетического уровня атома, находящегося в конечном состоянии, на четность испущенного фотона. Понятие четности оказалось очень плодотворным в физике микромира и было развито в рамках квантовой механики.

Понятие четности в квантовой механике относится к волновым функциям и соответствующим состояниям системы, которые описываются этими функциями. Это понятие неразрывно связано с предположением, что частица есть объект, симметричный относительно «правого» и «левого». Поэтому при зеркальном отражении пространства, при котором только и происходит замена правого на левое и наоборот, частица должна переходить сама в себя, т. е. она ничем не должна отличаться от своего зеркального изображения. Согласно законам квантовой механики волновые функции двух систем, в данном случае частицы и ее зеркального отображения, будут отличаться только числовым множителем, равным по модулю единице. Если ψ — волновая функция частицы, то $\psi \rightarrow \xi\psi$, где $|\xi| = 1$. Так как дважды повторенное отражение есть тождественное преобразование, а при этом $\psi = \xi^2\psi$, то $\xi^2 = 1$ и $\xi = \pm 1$. Число ξ и называется четностью (или внутренней «собственной» четностью) частицы.

В 1927 г. Вигнер показал, что правило Лапорта является следствием инвариантности электромагнит-

ных сил относительно зеркальной симметрии. Поскольку наличие такой симметрии для других видов взаимодействий не вызывало сомнений, то правило о сохранении четности было распространено и на другие микропроцессы — ядерные реакции, бета-распад и др. — и было возведено в ранг всеобщего закона.

Правило Лапорта по существу впервые указало на ту огромную роль, которую должны играть принципы симметрии в физике микромира. Эта роль стала особенно ясной после создания квантовой механики, когда выяснилось, что важнейшие квантовомеханические законы, в том числе и закон сохранения четности, являются следствием свойств симметрии пространства и времени. Закон сохранения четности утверждает: если состояние замкнутой квантовой системы обладает определенной четностью (т. е. если оно четно или нечетно), то эта четность сохраняется при любых изменениях системы со временем. Закон сохранения четности по существу утверждает, что природа в своей основе зеркально-симметрична: микропроцессы могут протекать и так, как они представляются отраженными в зеркале. «Для физиков являлась могучим источником вдохновения идейная простота и внутренняя красота симметрии, обнаруживаемой в сложных экспериментах. Появилась надежда, что природа таит в себе определенную упорядоченность, которую можно постигнуть... Чувство глубочайшего уважения к мощи законов симметрии никогда не ослабевает у того, кто обдумывал изящество и красоту безупречных математических доказательств и сопоставлял это со сложными и далеко идущими физическими следствиями»¹⁾.

При рассмотрении теоремы Нётер отмечалось, что в классической физике зеркальная симметрия (преобразование инверсии), хотя и играет определенную роль, но не приводит, в отличие от других преобразований пространства и времени, к какому-либо закону сохранения. Причина этого заключалась в том, что те преобразования (вращение и параллельный перенос), которые в классической физике приводили к законам сохранения, являются непрерывными

¹⁾ Я н г Ч ж э н ь - н и н, Закон сохранения четности и другие законы симметрии, УФН, т. 66, 1958, стр. 80.

преобразованиями, в то время как преобразование инверсии дискретно. Дискретность же является спецификой микропроцессов, и именно поэтому здесь преобразование инверсии привело к специфически квантовому закону сохранения четности.

Применительно к элементарным частицам четность состояния можно рассматривать как особое квантовое число, характеризующее поведение волновой функции частицы при инверсии (изменении направления координатных осей на обратное). Четность будет равна $+1$, если при этом преобразовании волновая функция не меняет знака, и -1 , если она меняет знак. Четность состояния сложной системы, состоящей из невзаимодействующих подсистем, равна произведению четностей этих подсистем. Если система, обладавшая четностью ξ , распалась на k невзаимодействующих подсистем с четностями ξ_k , то, согласно закону сохранения четности, совокупность этих подсистем должна иметь четность $\xi_1 \xi_2 \dots \xi_k = \xi$. Важность закона сохранения четности заключается в том, что на его основе можно производить отбор определенных вариантов процессов, в частности ядерных реакций. Правило отбора по четности весьма важно в теории элементарных частиц.

Все сказанное о законе сохранения четности позволило считать этот закон одним из важнейших и универсальных в физике микромира. Поэтому неудивительно, что открытие ограниченности действия этого закона произвело сенсацию и повело за собой далеко идущие последствия. Об этом открытии будет рассказано в следующем параграфе.

Наряду с пространственной четностью и законом ее сохранения, являющимся следствием инвариантности относительно пространственной инверсии (или, как говорят физики, P -инвариантности), существует понятие временной четности и закон ее сохранения, вытекающий из инвариантности относительно инверсии времени (T -инвариантность), т. е. замены в физических уравнениях t на $-t$. Это очень важный вид инверсии, роль которой в квантовой механике впервые исследовал Е. Вигнер еще в 1932 г.¹⁾. Роль пре-

¹⁾ Е. Вигнер, Теория групп, ИЛ, 1961.

образования $t \rightarrow -t$ в классической физике также весьма велика, в частности при рассмотрении проблемы необратимости и закона возрастания энтропии в термодинамике и статистике¹⁾.

Кроме рассмотренных двух четностей, современная физика ввела еще понятие о зарядовом сопряжении и зарядовой четности, связанной с инвариантностью относительно перемены знака зарядов частиц на противоположные, т. е. заменой частиц на античастицы (*C*-инвариантность).

Весьма важно подчеркнуть, что *P*-, *T*- и *C*-инверсии являются дискретными преобразованиями и поэтому приобретают особое значение в физике микромира, где появляются соответствующие им законы сохранения пространственной, временной и зарядовой четности. Запишем указанные законы сохранения в виде: $P=1$, $T=1$ и $C=1$. Доказываемая в квантовой механике теорема Людерса, Швингера и Паули (*CPT*-теорема) утверждает²⁾ сохранение величины *CPT*, т. е. что $CPT=1$. Эта теорема приобрела особую важность в теории элементарных частиц в связи с обнаруженным десять лет назад нарушением закона сохранения четности в так называемых слабых взаимодействиях (см. далее).

Замечательным следствием зеркальной симметрии квантовых законов микромира явилось предсказание существования античастиц, которое блестяще подтвердилось. В настоящее время можно считать твердо установленным фактом, что все элементарные частицы, как заряженные, так и нейтральные, имеют античастицы. Например, антипротон — отрицательно заряженный протон — был обнаружен в 1955 г. группой американских физиков. В последующие годы были открыты и другие античастицы.

Античастицы при столкновениях с соответствующими частицами могут аннигилировать, превращаясь либо в гамма-кванты, либо в другие формы поля. Как и процессы аннигиляции позитрона и электрона,

¹⁾ Л. Ландау и Е. Лифшиц, Статистическая физика, Изд-во «Наука», 1964.

²⁾ В. Паули, Принцип запрета, группа Лоренца, отражение пространства, времени и заряда. В сб. «Нильс Бор и развитие физики», ИЛ, 1958, стр. 46.

аннигиляция других частиц и античастиц подчиняется законам сохранения энергии и импульса.

Для дальнейшего необходимо сделать несколько замечаний относительно классификации взаимодействий частиц и полей. За последние годы существенное значение приобрела следующая классификация взаимодействий: сильные, слабые, электромагнитные и гравитационные. Для оценки этих взаимодействий вводят так называемую константу взаимодействия, размерность которой равна размерности электрического заряда. Интенсивность же взаимодействия характеризуется безразмерным параметром, представляющим собой отношение квадрата константы взаимодействия к произведению $\hbar c/2\pi$. При электромагнитных взаимодействиях (они имеют место между электрически заряженными частицами) константа взаимодействия равна электрическому заряду частицы e . Тогда характеризующий этот вид взаимодействия безразмерный параметр будет равен $\frac{2\pi e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$. Таким обра-

зом, интенсивность электромагнитного взаимодействия будет иметь порядок 10^{-2} . Соответственно безразмерный параметр, характеризующий сильные взаимодействия (например, взаимодействия между нуклонами), будет на два порядка выше, т. е. это взаимодействие будет иметь порядок 1. Указанным способом оцениваются и остальные взаимодействия: слабые имеют порядок 10^{-14} , а гравитационные — 10^{-39} . Именно слабые взаимодействия ответственны за бета-распад и некоторые другие процессы.

Для каждого из взаимодействий можно ввести характерное время, позволяющее оценивать длительность того или иного процесса. Так, сильным взаимодействиям соответствует характерное время порядка 10^{-23} сек. Это время, в течение которого нуклон, пролетая мимо другого нуклона, будет испытывать действие ядерных сил. Принимая радиус действия этих сил порядка 10^{-13} см, а скорость света $3 \cdot 10^{10}$ см/сек, получим, что характерное время сильных взаимодействий как раз равно (округленно) 10^{-23} сек. Соответственно характерное время электромагнитных взаимодействий будет на два порядка выше (10^{-21} сек), а слабых — 10^{-9} сек.

Специфические законы сохранения в теории элементарных частиц

Введение в физику микромира специфических квантовых законов сохранения связано с развитием теории элементарных частиц. Напомним современную классификацию элементарных частиц. Отметим, прежде всего, что пока еще нет определенного общепринятого критерия элементарности, так же как не существует теории, которая могла бы объяснить или предсказать число частиц и их внутренние свойства (массу, заряд, спин и др.). В настоящее время предпринимаются попытки создания такой единой теории.

Известные в настоящее время элементарные частицы можно объединить в группы:

1) Фотон — квант электромагнитного поля. Его отличительный признак — равенство нулю массы покоя. Согласно теории Максвелла взаимодействие заряженных частиц обусловлено тем, что частица создает вокруг себя электромагнитное поле, которое в свою очередь действует на другие заряженные частицы. Согласно квантовой теории поля взаимодействие осуществляется испусканием и поглощением частицами фотонов. Таким образом, фотоны ответственны за электромагнитное взаимодействие.

2) Лептоны — легкие частицы, взаимодействующие друг с другом и с другими частицами через электромагнитное и «слабое» поля. В группу лептонов входят два вида нейтрино и антинейтрино, электрон, позитрон, положительный и отрицательный μ -мезоны (мюоны).

3) Мезоны — нестабильные частицы с массой, промежуточной между массами электрона и протона. Известны две группы мезонов: π -мезоны (положительный π^+ , отрицательный π^- и нейтральный π^0) и K-мезоны (K^+ , K^0 , \bar{K}^0 , K^-).

4) Барионы — частицы, масса которых не меньше массы протона. Различают две группы барионов — нуклоны (протоны и нейтроны) и гипероны — нестабильные частицы с массой больше массы нейтрона.

Гипероны и K-мезоны обнаружили своеобразные особенности при образовании и распаде, что дало повод называть их странными частицами.

5) В 1952 г. группа физиков под руководством Э. Ферми обнаружила первую частицу из открытой в дальнейшем большой группы частиц с очень малым временем жизни ($\sim 10^{-23}$ сек), так называемых резонансов. Эти образования возникают при сильном взаимодействии элементарных частиц. По мнению известного американского теоретика М. Гелл-Манна, общее число резонансов должно достигать нескольких тысяч. Открытие резонансов имело очень большое значение для физики элементарных частиц¹⁾, в частности потому, что в этой связи вновь возник вопрос о смысле понятия «элементарности» частиц.

В связи с попытками решения проблемы элементарности частиц и их классификации было выдвинуто несколько гипотез, смысл которых состоит в том, что все многообразие частиц сводится к нескольким фундаментальным частицам. Наибольшее распространение в настоящее время получила гипотеза Гелл-Манна и Цвейга.

Согласно этой гипотезе все барионы и мезоны рассматриваются как частицы, состоящие из комбинации трех фундаментальных частиц (и их античастиц), которые Гелл-Манн назвал кварками (вольный перевод слова «кварк» — бредовый, дикий)²⁾, «Дикость» этой гипотезы заключается, в частности, в том, что кварки наделяются дробным электрическим зарядом. О свойствах кварков можно составить представление из следующей таблицы, в которой приведены значения основных присущих им сохраняющихся величин.

Вид кварка	Электрический заряд	Странность	Барионный заряд	Спин
p	$+2/3$	0	$1/3$	$1/2$
n	$-1/3$	0	$1/3$	$1/2$
λ	$-1/3$	-1	$1/3$	$1/2$

¹⁾ В. Г. Гришин, Резонансные взаимодействия элементарных частиц, УФН, т. 86, в. 1, 1965, стр. 71.

²⁾ Я. Б. Зельдович, Классификация элементарных частиц и «кварки» в изложении для пешеходов, УФН, т. 86, в. 2, стр. 303.

На основе гипотезы кварков уже удалось разрешить некоторые трудности теории элементарных частиц и наметить рациональную схему их классификации. Но попытки экспериментального обнаружения кварков пока что не увенчались успехом.

В связи с открытием большого количества новых частиц и попытками их систематизации в физику элементарных частиц был введен ряд новых квантовых чисел, связанных со специфическими законами сохранения, налагающими определенные ограничения на возможные взаимопревращения частиц.

Напомним читателю, что квантовые числа впервые появились в теории Бора еще до создания квантовой механики. Бор ввел главное квантовое число n , характеризующее дискретность значений энергии электрона в атоме. В дальнейшем потребовалось введение и других квантовых чисел — орбитального квантового числа, определяющего дискретные значения момента импульса атомного электрона, а также магнитного квантового числа, связанного с проекцией орбитального момента на направление внешнего магнитного поля. Эта проекция квантуется, т. е. может принимать не любые значения, а только такие, которые отличаются друг от друга на $\hbar/2\pi$.

Что касается элементарных частиц, то они характеризуются массой, средней продолжительностью жизни (для нестабильных частиц), электрическим зарядом и спином. Кроме этих характеристик, весьма существенную роль в физике элементарных частиц играют еще два квантовых числа, которые могут быть разными для различных частиц. Это изотопический спин и странность, которые существенны для описания как свойств частиц, так и характера взаимодействия их друг с другом. Весьма важно то обстоятельство, что изотопический спин и странность связаны с соответствующими специфическими законами сохранения.

Прежде чем рассмотреть эти числа, обратимся к понятию обычного спина.

В 1925 г. голландские физики Г. Юленбек и С. Гаудсмит для объяснения некоторых особенностей атомных спектров высказали гипотезу о том, что электрон должен также обладать собственным моментом импульса. Эта величина была названа спином. Электрон,

таким образом, уподоблялся заряженному шарик, вращающемуся вокруг оси наподобие волчка. Гипотеза о спине соответствовала опытным фактам, если допустить, что в магнитном поле электрон мог лишь двояким образом ориентироваться относительно направления поля: либо так, что его магнитный и механический моменты совпадали с направлением поля, либо были противоположны ему. При таком допущении уравнение движения электрона при одних и тех же квантовых числах, характеризующих его орбитальное движение, приводило к двум решениям, которым соответствовали два значения спина электрона: $\sigma_1 = +\frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$ и $\sigma_2 = -\frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$, или кратко $+\frac{1}{2}$ и $-\frac{1}{2}$, если в качестве единицы спина взять $h/2\pi$. Так появилось четвертое, спиновое квантовое число (коротко — спин).

В дальнейшем понятие спина было распространено на другие элементарные частицы. В современной квантовой теории каждой частице приписывается собственный момент импульса, не связанный с ее движением в пространстве. Частицы могут обладать как целым спином (фотон, мезоны), так и полуцелым (нейтрон, протон и т. д.).

Наряду с зарядом и массой спин является важнейшей характеристикой элементарных частиц. Будучи квантовомеханическим обобщением понятия механического момента импульса, спин удовлетворяет специфическому квантовому закону сохранения, являющемуся аналогом закона сохранения момента количества движения в макрофизике.

Рассмотрим теперь понятия изотопического спина и странности.

Среди многообразия элементарных частиц можно выделить определенные их группы, имеющие близкие свойства (спин, четность, почти одинаковую массу), но отличающиеся электрическим зарядом. Такие группы частиц называются зарядовыми мультиплетам. Примерами таких групп являются протон и нейтрон — частицы, которые рассматриваются как два состояния одной и той же частицы — нуклона; группа из положительного, отрицательного и нейтрального π -мезонов;

положительный, отрицательный и нейтральный Σ -гипероны и др.

Еще в 1932 г. В. Гейзенберг при исследовании ядерных взаимодействий предложил рассматривать протон и нейтрон как два различных состояния нуклона¹⁾. Эта идея была затем обобщена, и физики стали рассматривать частицы, принадлежащие к одному и тому же зарядовому мультиплету, как различные состояния одной и той же частицы. Для того чтобы отличить одну частицу от другой в зарядовом мультиплете, Гейзенберг и ввел понятие об изотопическом спине. Эта величина имеет векторный характер. Так, для группы нуклонов он равен по абсолютной величине $1/2$, а его проекции принимают два значения: $+1/2$ для протона и $-1/2$ для нейтрона. В этом случае говорят, что протон и нейтрон образуют изотопический дублет. Аналогично π -мезоны образуют изотопический триплет, причем компонентами изотопического спина являются $+1$, 0 , -1 .

Силы ядерного взаимодействия не зависят от того, одинаковые нуклоны или разные (т. е. эти силы одинаковы как между протоном и нейтроном, так и между двумя протонами и между двумя нейтронами). Это свойство ядерных сил называется их зарядовой независимостью.

Поскольку понятие изотопического спина возникло при исследовании ядерных взаимодействий (именно, их зарядовой независимости), то это понятие применимо только к частицам, участвующим в сильных взаимодействиях. По отношению к лептонам и фотону это понятие не имеет никакого смысла. Имеет место закон сохранения изотопического спина, сформулированный в 1937 г. Е. Вигнером.

Следует сделать замечание относительно самого термина «изотопический спин». Термин этот оказался не очень удачным, и его пытались заменить другим. Неудачен он потому, что с ним ассоциируется некое вращение (как с понятием обычного спина), хотя никакого вращення здесь нет. Единственная формальная аналогия с обычным спином состоит в том, что если

¹⁾ W. Heisenberg, Zeitschr. für Physik, 1932, Bd. 77, H. 1—2.

проекция его на направление магнитного поля (так называемая «зетовая составляющая») квантуется и принимает значения, отличные одно от другого на единицу, то аналогично квантуются и принимают отличные на единицу значения и составляющие изотопического спина. Важно также подчеркнуть, что если с обычным спином связаны определенные свойства пространства и времени, то эти свойства к изотопическому спину не имеют никакого отношения. Однако формально математически можно ввести понятие об «изотопическом пространстве» и рассматривать закон сохранения изотопического спина как выражение неких свойств симметрии этого воображаемого пространства. Что касается истинной связи понятия изотопического спина со свойствами симметрии реального пространства, то этот вопрос пока еще не решен.

В связи с попытками объяснить, почему одни превращения элементарных частиц возможны, а другие нет, было также обобщено и понятие электрического заряда. Вигнер ввел понятие о барионном числе как квантовом числе, равном $+1$ для нуклонов, -1 для антинуклонов и 0 для π -мезонов. В этом случае оказалось возможным объяснить различные закономерности взаимодействий и распада тяжелых частиц — барионов на основе специфически квантового закона сохранения барионного числа, согласно которому в изолированной системе барионное число является постоянной величиной. Этот закон выражает факт неуничтожимости тяжелых частиц, и его можно рассматривать как обобщение закона сохранения электрического заряда. Действительно, согласно последнему, если при взаимодействиях частиц рождается частица с положительным зарядом, то одновременно должна родиться и частица с отрицательным зарядом. Соответственно при исчезновении положительного заряда должен исчезнуть и отрицательный заряд. Точно так же, согласно закону сохранения барионного числа, при рождении бариона должен одновременно родиться и антибарион. Таким образом, при рождении пары барион — антибарион барионное число остается неизменным.

Физическая природа закона сохранения барионного числа в настоящее время еще не выяснена, поскольку

ку неизвестны те свойства симметрии, которые обуславливают действие этого закона. Следует отметить, что закон сохранения барионного числа выполняется для всех четырех рассмотренных выше взаимодействий: сильного, электромагнитного, слабого и гравитационного.

Для легких частиц (лептонов) Я. Б. Зельдович и Е. Конопинский в 1953 г. ввели аналогичное понятие лептонного числа. Это квантовое число равно $+1$ для лептонов и -1 для антилептонов. Лептонное число подчиняется закону сохранения, который ограничивает число возможных процессов образования и распада легких частиц. Как следствие из него вытекает, что лептоны и антилептоны всегда возникают и исчезают парами. Закон сохранения лептонного заряда выполняется только в слабых взаимодействиях.

После открытия и изучения некоторых необычных свойств «странных» частиц выяснилось, что рассмотренных выше квантовых законов сохранения недостаточно для понимания наблюдаемых фактов. Анализируя этот вопрос, М. Гелл-Манн и К. Нишижима предложили ввести еще одно квантовое число — «странность», положив его равным для обычных частиц (π -мезонов и нуклонов) нулю, а для «странных» частиц (K -мезонов и гиперонов) отличным от нуля. «Странность» представляет собой целое число, равное $+1$ для K^0 -мезонов и Λ^0 -гиперона и -1 для других видов гиперонов.

В области сильных взаимодействий выполняется закон сохранения «странности». Нарушение этого закона происходит при слабых взаимодействиях. Закон сохранения этой величины был введен для описания того наблюдаемого факта, что в ряде процессов сильных взаимодействий частицы возникают только парами (например, при столкновениях π -мезонов с протонами происходит превращение $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$).

Приведенные специфические законы сохранения в совокупности выражают правила отбора, налагающие определенные ограничения на возможные взаимопревращения элементарных частиц. Вместе с классическими законами сохранения они помогают предсказывать многообразие элементарных процессов в микромире.

Специфичность квантовых законов сохранения состоит в том, что каждый из них связан с определенной совокупностью чисел. Если отбросить мистику, то, пожалуй, можно согласиться с тем, что «последователи Пифагора, узнав о том, что делается сегодня, могли бы с полным правом сказать, что числа управляют миром, и настолько, насколько мы понимаем сейчас природу, они были бы правы»¹⁾).

Выше неоднократно подчеркивалась фундаментальная роль принципов симметрии и их связи с законами сохранения в физике элементарных частиц. Можно с полным правом утверждать, что на современном уровне развития теории схема «принцип симметрии — инвариантность — закон сохранения» превратилась в руководящий принцип и является наиболее полным выражением идеи сохранения. «Современный физик, исследуя явления в мире элементарных частиц, считает свою работу завершенной, если он может сформулировать закономерности экспериментального материала в краткой форме законов сохранения»²⁾).

Ярким выражением указанной выше схемы является так называемая унитарная симметрия, предложенная американским физиком М. Гелл-Манном и независимо от него израильским ученым И. Нееманом в 1961 г. На унитарной симметрии основана современная классификация элементарных частиц. Следует, однако, отметить, что уложить все известные частицы в единую схему классификации на сегодняшний день еще не удалось. Из этой общей схемы выпадает группа легких частиц — лептонов.

Успех в этом отношении достигнут пока в области сильно взаимодействующих частиц — барионов, мезонов и резонансов. Эти три группы частиц по предложению советского физика Л. Б. Окуня принято объединять наименованием «адроны» (т. е. «массивные частицы»).

Первая попытка классификации адронов была предпринята еще в 1956 г. японским физиком С. Са-

¹⁾ А. Салам, *Элементарные частицы*, УФН, т. 74, в. 1, 1961, стр. 155.

²⁾ Я. А. Смородинский, *Унитарная симметрия элементарных частиц*, УФН, т. 84, в. 1, 1964, стр. 3.

катой, который расширил понятие об изотопической симметрии. Схема Сакаты относилась к барионам и мезонам, поскольку резонансы в то время еще не были открыты (первые группы резонансов были открыты в 1960 г.). Согласно схеме Сакаты все барионы и мезоны можно образовать из трех фундаментальных барионов — протона, нейтрона и Λ -гиперона и их античастиц. Согласно принятой терминологии эти три бариона образуют один изотопический дублет (протон и нейтрон) и один изотопический синглет Λ^1). Схема Сакаты удовлетворительно объясняла наблюдаемые свойства барионов и мезонов до тех пор, пока не были открыты резонансы. С открытием этих частиц от нее пришлось отказаться, поскольку в эту схему резонансы не укладывались.

В сильных взаимодействиях выполняется закон сохранения изотопического спина. Именно благодаря этому обстоятельству нуклоны существуют в двух зарядовых состояниях: положительном (протон) и нейтральном (нейтрон). Но этот закон сохранения нарушается при электромагнитных взаимодействиях, что приводит к появлению небольшого различия в массах протона и нейтрона; как говорят, возникает расщепление масс изотопического дублета.

Дальнейшим расширением и обобщением изотопической симметрии и является унитарная симметрия, включающая в себя изотопическую симметрию как частный случай. Группа частиц, связанных друг с другом симметрией изотопического спина, образует зарядовые мультиплеты. Так, например, нуклонный дублет состоит из двух зарядовых состояний (двух частиц) — положительного и нейтрального. Пионный триплет (три пи-мезона: π^- , π^0 , π^+) состоит из отрицательного, нейтрального и положительно заряженного состояний. Число различных зарядовых состояний в мультиплете, или, как принято говорить, «мультиплетность», связано с квантовым числом изотопического спина.

Унитарная симметрия устанавливает наличие внутренних связей между частицами, принадлежащими к

¹⁾ Подробнее см. К. И. Щёлкин, Физика микромира, стр. 196.

различным изотопическим мультиплетам и обладающими разной «странностью» (или гиперзарядом, под которым понимают сумму «странности» и барионного числа). Несколько таких изотопических мультиплетов образуют унитарный мультиплет (супермультиплет). С точки зрения унитарной симметрии частицы, входящие в унитарный мультиплет, тождественны, хотя в действительности они различаются по массе, изотопическому спину и «странности». Считается, что это различие существует благодаря умеренно сильному (среднесильному) взаимодействию, природа которого пока еще не выяснена.

Таким образом, подобно тому как расщепление масс изотопического дублета есть результат нарушения закона сохранения изотопического спина в электромагнитных взаимодействиях, расщепление масс в супермультиплете можно рассматривать как нарушение некоего закона сохранения в области среднесильных взаимодействий.

Согласно Гелл-Манну, «решение задачи должно быть таким, что гиперзаряд и изотопический спин в сильных взаимодействиях строго сохраняются, однако некоторые другие законы сохранения нарушаются некоторым аспектом или некоторой частью этого же самого взаимодействия. Если допустить частичное нарушение еще одного принципа симметрии, можно сгруппировать барионные мультиплеты с разными значениями гиперзаряда и изотопического спина, но с одинаковыми значениями четности и спина. Эта новая система симметрии будет связывать различные значения гиперзаряда и изотопического спина точно так же, как электромагнитное взаимодействие приводило к расщеплению масс у членов зарядового мультиплета за счет нарушения симметрии изотопического спина. Шкала расщепления масс в супермультиплете будет значительно больше, чем наблюдаемое в мультиплете, поскольку в расщеплении супермультиплета принимает участие скорее большая доля «сильных» сил, чем сил электромагнитных, которые к тому же еще и намного слабее»¹⁾.

¹⁾ М. Гелл-Манн, А. Розенфельд, Дж. Чу, УФН, т. 83, в. 4, 1964, стр. 715.

Экспериментальное и теоретическое развитие физики элементарных частиц подтвердило плодотворность модели унитарной симметрии.

Именно на этой основе Гелл-Манном было предсказано существование неизвестной ранее частицы (Ω -гиперона), которая была экспериментально обнаружена в 1964 г. группой американских физиков.

Таким образом, мы видим, что благодаря развитию теории элементарных частиц законы сохранения постепенно превратились в центральную, стержневую часть современной физики. «То немного, что нам удалось узнать о взаимодействиях и превращениях элементарных частиц, установлено в значительной мере благодаря определенным законам сохранения, управляющим поведением этих частиц»¹⁾.

Есть существенная разница между классическими законами сохранения и законами сохранения, действующими в мире элементарных частиц. Классические законы сохранения и соответствующие им симметрии не нарушаются ни в одном из известных нам процессов. Специфические же законы сохранения и связанные с ними симметрии выполняются не во всех случаях и оказываются, таким образом, приближенными. Истинные причины нарушений некоторых из этих законов пока еще не найдены, и на этот счет существуют лишь гипотезы (см. ниже). Подчеркнем еще раз, что на современном уровне наших знаний о микромире физическая природа квантовых законов сохранения еще не выяснена.

В настоящее время существует следующая ситуация. Ряд симметрий и соответствующих им законов сохранения справедлив для всех видов взаимодействий (сильного, электромагнитного, слабого и гравитационного). Вместе с тем существуют и такие симметрии, которые нарушаются при слабых взаимодействиях, но сохраняются в остальных взаимодействиях. Наконец, существуют симметрии, которые нарушаются при слабых и электромагнитных взаимодействиях, но сохраняются при сильных взаимодействиях. В настоящее время известна лишь одна симметрия последнего вида —

¹⁾ К. Ф о р д, Мир элементарных частиц, ИЛ, 1965, стр. 110.

симметрия относительно вращения в изотопическом пространстве, которой соответствует закон сохранения изотопического спина. В связи с этим существенно отметить, что вследствие нарушения указанной симметрии в электромагнитных взаимодействиях появляется разница в массах протона и нейтрона ($\sim 0,14\%$), приводящая к дефекту массы и другим вытекающим отсюда последствиям.

Что касается гравитационного взаимодействия, то вопрос о том, какие симметрии оно нарушает, пока остается открытым. По-видимому, этот вопрос получит свое решение в той теории элементарных частиц, в которой отводится и соответствующая роль гравитации.

Таким образом, наблюдается определенная закономерность при переходе от одних взаимодействий к другим. А именно, переход от сильных взаимодействий к электромагнитным и слабым сопровождается утратой некоторых законов сохранения.

Сильные взаимодействия характеризуются законами сохранения следующих величин:

- 1) энергии,
- 2) импульса,
- 3) момента количества движения,
- 4) спина,
- 5) электрического заряда,
- 6) барионного заряда,
- 7) изотопического спина,
- 8) пространственной четности (P),
- 9) зарядовой четности (C),
- 10) временной четности (T),
- 11) комбинированной четности (CP).

В области электромагнитных взаимодействий выполняются все эти законы, за исключением закона сохранения изотопического спина. В области слабых взаимодействий, кроме того, нарушаются законы сохранения пространственной четности (в этом случае природа различает «правое» и «левое») и, по-видимому (см. дальше), закон сохранения комбинированной четности.

В таблице приведены основные законы сохранения микромира и соответствующие им симметрии.

Наименование законов сохранения	Инвариантности относительно	Форма симметрии
Закон сохранения пространственной четности	преобразования инверсии (P)	Зеркальная симметрия
Закон сохранения временной четности	преобразования инверсии времени (T)	Симметрия относительно замены t на $-t$
Закон сохранения зарядовой четности	преобразования инверсии знака заряда (C)	Симметрия относительно замены частиц на античастицы
Закон сохранения комбинированной четности	одновременной инверсии (CP)	Симметрия относительно одновременно выполняемого зеркального отображения и замены частиц на античастицы
Закон сохранения изотопического спина	поворота в изотопическом пространстве	Изотропность изотопического пространства
Закон сохранения CPT	одновременно произведенных трех операций C , P и T	Симметрия относительно зарядового сопряжения, зеркального отражения и обращения времени

В заключение отметим, что принципы симметрии в микромире являются более сложными и глубокими (и далеко не столь очевидными), чем в макромире. Однако тот факт, что в микромире выполняются все классические законы сохранения, по-видимому, указывает на то, что свойства симметрии пространства-времени в масштабах микромира принципиально не должны отличаться от их свойств в макромире. Однако этот вопрос требует дальнейшего глубокого изучения.

Важно отметить и следующее обстоятельство. Теоретической основой вывода законов сохранения классической физики являлись законы Ньютона. Сохраняющиеся величины фигурируют здесь в качестве основных характеристик движущегося тела или системы. Вывод этих законов сохранения из принципов симмет-

рии — логическое завершение длительной эволюции физики на протяжении столетий. Важнейшим уроком этой эволюции явился более глубокий подход к законам сохранения, полностью оправдавший себя в физике микромира. Оказалось, что законы сохранения можно получать непосредственно из принципов симметрии, минуя законы движения. В этом — важнейшее методологическое значение рассмотренных идей.

Нарушение закона сохранения четности в слабых взаимодействиях и связанные с этим проблемы

Принцип зеркальной симметрии, т. е. утверждение о симметрии между миром и его зеркальным отражением (инверсия пространства), с момента его открытия не вызывал сомнений в своей справедливости. Развитие физики в последнее десятилетие принесло много неожиданностей, среди которых было и открытие несохранения четности в слабых взаимодействиях. Это обстоятельство заставило физиков по-иному взглянуть на многие устоявшиеся понятия и представления. Остановимся кратко на идеях и экспериментах, связанных с открытием несохранения четности.

В 1947 г. Г. Рочестером и С. Батлером были впервые обнаружены частицы, позже названные К-мезонами, масса которых равнялась приблизительно 966 электронным массам с положительным и отрицательным электрическим зарядом. Позже были открыты нейтральные К-мезоны. Все эти мезоны нестабильны и в течение короткого времени распадаются на другие частицы. Тщательное изучение свойств вновь открытых частиц выявило весьма интересную их особенность: они могли распадаться различными способами. Например, K^+ -мезон спустя примерно 10^{-8} сек в числе прочих распадов мог распадаться по таким схемам: $K^+ = \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$ и $K^+ = \pi^+ + \pi^0$. К этому времени свойства π -мезонов были уже достаточно хорошо известны. В частности, было установлено, что π -мезоны являются нечетными частицами, т. е. их четность — 1. Так как четность распавшейся частицы должна быть равна произведению четностей образовавшихся из нее частиц, то отсюда следовало, что по первой схеме распада K^+ — нечетная частица, а по второй — четная.

Подобная ситуация, естественно, казалась парадоксальной, так как одна и та же частица не может быть одновременно нечетной и четной. Напрашивался вывод, что в рассмотренных двух распадах физики имели дело с двумя разновидностями K^+ -мезона — нечетной и четной. В связи с этим их стали обозначать различными буквами: нечетные K^+ -мезоны — символом θ , а четные — τ .

Однако накопленный в последующие годы экспериментальный материал приводил к заключению, что θ и τ не могут быть различными частицами. В пользу такой точки зрения, в частности, говорили очень тщательно проведенные эксперименты по определению масс и времени жизни, показавшие, что эти важнейшие константы элементарных частиц совпадают у этих двух сортов мезонов.

Первоначальное предположение заключалось в том, что, возможно, существует неизвестное еще свойство симметрии ядерных сил, которое обуславливает существование двух одинаковых по четности частиц (так называемых дублетов по четности). Однако такая возможность вскоре была отвергнута. Дело в том, что, помимо указанных выше двух типов распадов K^+ -мезона, были известны еще его распады с участием нейтрино. Если считать, что распад с участием нейтрино происходит одинаково для частиц с различной четностью, входящих в дублет, то тогда следовало бы ожидать заметного отличия в их временах жизни, связанного с различной частотой τ - и θ -распадов (приблизительно 8% и 25% соответственно).

Таким образом, к 1956 г. сложилось следующее положение: закон сохранения четности приводил к выводу, что τ - и θ -мезоны — различные частицы, а все прочие данные говорили в пользу того, что это — одна и та же частица. Так возникла знаменитая «загадка $\tau-\theta$ », доставившая немало хлопот теоретикам. «Положение, в котором очутились физики в то время, — говорил в своем нобелевском докладе Янг Чжень-нин, — было подобно положению человека, нащупывающего выход из темной комнаты: он знает, что где-то должна быть дверь, ведущая наружу; но в каком направлении эта дверь?»¹⁾

¹⁾ УФН, т. 66, в. 1, 1958, стр. 86.

Перед физиками возникла дилемма: либо отказаться от закона сохранения четности, который с момента его открытия не вызывал никаких сомнений, либо признать, что τ - и θ -мезоны являются разными частицами, что повлекло бы непреодолимые трудности в объяснении экспериментального материала. Дилемма была столь острой потому, что закон сохранения четности казался универсальным законом природы, вытекавшим из проверенных многолетней практикой свойств симметрии пространства — его изотропности и существования зеркальной симметрии. Несохранение четности, следовательно, могло означать только то, что пространство, в котором протекают микропроцессы, не изотропно, что в нем имеется асимметрия между левым и правым. Законы сохранения классической физики со всей определенностью говорили в пользу изотропности пространства. Оставалось предположить, что свойства симметрии пространства в масштабах микромира должны отличаться от свойств пространства в макромире.

Летом 1956 г. Ли Цзун-дао и Янг Чжэнь-нин опубликовали работу «Вопрос о сохранении четности в слабых взаимодействиях», в которой высказали гипотезу, что «загадка $\theta - \tau$ » решается, если отказаться от закона сохранения четности в слабых взаимодействиях, полагая, что в данном случае он не выполняется. Эта смелая гипотеза основывалась на том, что по существу никто никогда не ставил прямых экспериментов по проверке выполнения закона сохранения четности в слабых взаимодействиях. Выполнение его считалось само собой разумеющимся. В упомянутой статье эти ученые, в частности, писали, что «существующие эксперименты с высокой степенью точности доказывают сохранение четности в сильных и электромагнитных взаимодействиях; что же касается слабых взаимодействий (т. е. взаимодействий, приводящих к распаду мезонов и гиперонов, и β -распада), то сохранение четности в них до сих пор является лишь экстраполированной гипотезой, не подкрепленной экспериментальными доказательствами. (Можно даже сказать, что существующие в настоящее время затруднения с частицами θ и τ можно рассматривать как указание на нарушение четности в слабых взаимодействиях.)... Чтобы одно-

значно решить вопрос о сохранении четности в слабых взаимодействиях, следует поставить эксперимент, который позволил бы установить, различаются ли в слабых взаимодействиях правое и левое»¹⁾).

Эту мысль Янг подчеркивает и в нобелевском докладе: «Очень удивительным оказался тот факт, что без экспериментального подтверждения в течение очень долгого времени считалось, что в слабых взаимодействиях справедлив закон сохранения четности. Но еще более удивительной казалась надежда на то, что так хорошо изученный физиками закон пространственно-временной симметрии может оказаться нарушенным. Как раз эта надежда не привлекала нас. Скорее, так сказать, мы пришли к ней в результате крушения надежд на раскрытие «загадки $\theta-\tau$ » в многочисленных попытках другого рода»²⁾).

Среди процессов слабых взаимодействий β -распад был изучен наиболее досконально. Казалось странным, почему в течение многих лет не было получено ни одного непосредственного указания на то, что в слабых взаимодействиях не выполняется закон сохранения четности. Это обстоятельство объясняется двумя причинами. Первая из них обусловлена свойствами нейтрино. Не имея массы покоя, эта частица, участвующая в β -распаде, не позволяет однозначно по изучению β -спектра решить вопрос о сохранении четности. Другой причиной является то, что во всех экспериментах с β -распадом проверялись только четности ядерных уровней, чего совершенно недостаточно. Проверку закона сохранения четности необходимо было провести для всего процесса β -распада в целом.

Таковы были те соображения, которые побудили Ли и Янга предложить ряд экспериментов по изучению β -распада. Они предложили измерить угловое распределение электронов, испускаемых при β -распаде так называемых ориентированных ядер. В таком эксперименте ничто не должно было мешать основной задаче — установлению зеркальной симметрии между двумя направлениями спина распадающегося ядра.

¹⁾ Сб. «Новые свойства симметрии элементарных частиц», ИЛ, 1957, стр. 13—14.

²⁾ УФН, т. 66, в. 1, 1958, стр. 83.

Уже указывалось, что спин можно связать с «направлением вращения» частицы соответственно по часовой или против часовой стрелки. Наличие зеркальной симметрии должно было бы проявиться в одинаковой вероятности вылета частиц из распадающегося ядра в обе стороны от оси его «вращения». Если же эта симметрия отсутствует, то число «левовращающихся» частиц должно было быть отлично от числа «правовращающихся». В этом случае частицы как бы обнаружат свое собственное отношение к двум противоположным направлениям в пространстве.

Решить вопрос о выборе одной из этих двух возможностей в обычных условиях наблюдения β -распада невозможно. Вся картина усредняется из-за хаотического теплового движения ядер. Поэтому и спины распадающихся ядер имеют случайное направление, что приводит в свою очередь к наблюдаемому равенству чисел частиц, вылетевших из ядер во всех направлениях. Следовательно, для постановки решающего опыта прежде всего нужно «выстроить» спины ядер в одном направлении. Для этого потребовалось сначала сильно ослабить тепловое движение ядер, охладив вещество до очень низкой температуры, а затем воздействовать на спиновые магнитные моменты ядер очень сильным магнитным полем.

После того как ядра радиоактивного препарата одинаково ориентированы в пространстве, необходимо с двух сторон от препарата расположить счетчики частиц, в свою очередь ориентируя их так, чтобы они улавливали только те частицы, которые вылетают в диаметрально противоположных направлениях. Это можно осуществить, расположив один счетчик под произвольным углом α по отношению к направлению спинов, а другой — под углом $180^\circ - \alpha$ по отношению к той же линии, но с другой стороны. При таком расположении экспериментатор будет иметь дело с двумя устройствами, как бы зеркально-симметричными относительно друг друга. Если процесс распада зеркально-симметричен, то следовало ожидать, что оба счетчика покажут одни и те же результаты (одинаковое количество частиц). Если бы результаты оказались разными, то это указывало бы на то, что симметрии между правым и левым не существует. Подобный опыт дол-

жен был дать совершенно определенный ответ на вопрос, выполняется ли закон сохранения четности в слабых взаимодействиях.

Уверенность физиков в положительном ответе, т. е. в том, что четность сохраняется, была очень велика. Это можно видеть, например, из одного из писем Паули, написанного незадолго до практического осуществления рассмотренного эксперимента: «Я не верю в то, что бог — слабый левша (т. е. что „левовращающихся“ частиц будет больше. — Я. Г.), и я готов держать пари на крупную сумму за то, что эксперименты дадут результаты, соответствующие наличию симметрии»¹⁾. Спустя десять дней (27 января 1957 г.) Паули писал: «Теперь, когда первое потрясение уже миновало, я начинаю приходить в себя. Действительно, все было весьма драматично. Во вторник 21 числа в 8 часов вечера я предполагал прочитать лекцию о нейтринной теории. В 5 часов вечера я получил три экспериментальные работы. Я был потрясен не столько тем, что бог предпочитает левую руку, сколько тем, что он сохраняет симметрию между левым и правым, когда он проявляет себя сильным (т. е. в сильных взаимодействиях. — Я. Г.). Короче говоря, мне представляется сейчас самой актуальной проблемой выяснение вопроса о том, почему сильные взаимодействия симметричны относительно левого и правого»¹⁾.

В течение этих десяти дней, прошедших между двумя цитированными письмами, группой американских физиков во главе с Ч. Ш. Ву был закончен эксперимент, предложенный Ли и Янгом. Он подтвердил гипотезу о несохранении четности в слабых взаимодействиях.

Опыт показал большую асимметрию в распределении частиц: они испускались преимущественно в направлении, противоположном спине радиоактивных ядер (кобальта). Эта асимметрия могла быть результатом только асимметрии самого процесса β -распада, так как само экспериментальное устройство обладало зеркальной симметрией. Почти одновременно с описанным экспериментом Ву другая группа физиков (Р. Гарвин, Л. Ледерман и М. Вейнрих) поставила

¹⁾ УФН, т. 74, в. 1, 1961, стр. 157.

эксперимент, в котором выявилось несохранение четности при распаде π - и μ -мезонов.

После экспериментального доказательства несохранения внутренней четности состояния в слабых взаимодействиях, протекающих с участием нейтрино (β -распад, распад π - и μ -мезонов), ученые обратились к экспериментам по проверке сохранения четности в процессах, связанных со слабыми взаимодействиями, которые протекают без участия нейтрино, например в процессах образования и распада гиперонов. Выяснилось, что и в этом случае закон сохранения четности не выполняется. Таким образом, в настоящее время можно считать доказанным, что во всех известных процессах, связанных со слабыми взаимодействиями, закон сохранения четности нарушается.

Крушение закона сохранения четности поставило перед физиками ряд важных вопросов, непосредственно затрагивающих самые основы представлений о свойствах пространства, о структуре элементарных частиц и специфических законах сохранения микромира.

Прежде всего о законах сохранения. Если в слабых взаимодействиях нарушается важнейший закон природы — закон сохранения четности, то, естественно, возникает вопрос и о других законах сохранения: выполняются или они в этом классе взаимодействий или же они также теряют свою силу. Относительно классических законов сохранения ответ на этот вопрос мы уже знаем — они имеют силу во всех без исключения процессах. Специальные исследования показали, что закон сохранения барионного заряда, по-видимому, выполняется. Однако зарядовая четность не сохраняется. Открытым пока остается вопрос о том, сохраняется ли одновременно комбинированная четность (т. е. произведение четностей PC) и временная четность T (см. стр. 244).

Другим нерешенным в настоящее время вопросом теории слабых взаимодействий является объяснение того факта, что среди большого количества типов распадов, не противоречащих ни одному из справедливых в области слабых взаимодействий законов сохранения, практически наблюдается лишь их небольшое число. Остается также пока неясным и то, почему закон сохранения четности нарушается только в об-

ласти слабых взаимодействий и выполняется в других классах взаимодействий.

В настоящее время мыслимы две причины несохранения четности. Первая из них обусловлена внутренней асимметрией самих частиц по отношению к правому и левому. Такая точка зрения была высказана уже в первой работе Ли и Янга и независимо от них пакистанским физиком А. Саламом и наиболее отчетливо сформулирована советским физиком Л. Д. Ландау. Так, в цитированной выше работе Ли и Янга «Вопрос о сохранении четности в слабых взаимодействиях» мы читаем: «Закон сохранения четности обычно принимается без какого-либо обсуждения возможных пределов его применимости. В действительности априори нет причин, по которым его нарушение было бы нежелательным. Как известно, такое нарушение предполагает наличие право-левой асимметрии. Мы рассматривали выше несколько возможных способов обнаружения подобной асимметрии. Эти эксперименты позволяют установить, действительно ли существующие в настоящее время элементарные частицы обладают право-левой асимметрией. Если бы такая асимметрия была обнаружена на самом деле, все еще возникал бы вопрос, не могут ли существовать частицы, обладающие противоположной асимметрией, так, чтобы в более широком смысле по-прежнему имела место общая симметрия правого и левого»¹⁾).

При такой концепции мыслимы два сорта протонов — правых и левых, а несохранение четности является следствием не «отсутствия инвариантности относительно инверсии, а имеющего космологическое происхождение локального преобладания»²⁾ числа правых протонов над левыми протонами.

Идею Ли и Янга можно пояснить следующим образом: пусть частица обладает некоторой внутренней асимметрией по отношению к правому и левому. Для наглядности можно с каждой частицей связать воображаемый «правый винт» или говорить о «правой спиральности». Так как при отражении правая спираль

¹⁾ Сб. «Новые свойства симметрии», стр. 23.

²⁾ Там же, стр. 24.

превращается в левую, то ясно, что при зеркальной инверсии частица уже не будет переходить сама в себя, т. е. она не будет тождественна со своим зеркальным отображением. Отсюда следует, что преобразование волновой функции типа $\psi \rightarrow \xi\psi$ не будет иметь места и поэтому само понятие четности как следствие этого преобразования теряет смысл. Мы видим, что идея внутренней асимметрии частиц приводит и к изменению образа элементарных частиц: частицы-точки заменяются частицами-«спиралями».

В 1957 г. Л. Д. Ландау в заметке «О законах сохранения при слабых взаимодействиях» также высказал идею, что несохранение четности связано не с асимметрией пространства, а есть следствие асимметрии самих элементарных частиц: «На первый взгляд кажется, что несохранение четности означает асимметрию пространства по отношению к инверсии. Такая асимметрия, учитывая полную изотропию пространства (сохранение момента), представляется более чем странной, и, на мой взгляд, простой отказ от сохранения четности поставил бы теоретическую физику в тяжелое положение. Я хотел бы обратить внимание на то, что из этого положения существует выход, заключающийся в следующем. Как мы знаем, в сильных взаимодействиях, несомненно, имеет место как закон сохранения четности, так и инвариантность относительно зарядового сопряжения. Предположим, что при слабых взаимодействиях оба эти закона не имеют места в отдельности. Однако имеет место инвариантность относительно совокупности обеих операций, которую мы назовем комбинированной инверсией. При комбинированной инверсии происходит одновременно пространственная инверсия и переход частиц в античастицы.

Инвариантность всех взаимодействий относительно комбинированной инверсии, как легко видеть, оставляет пространство полностью симметричным, асимметричными же оказываются электрические заряды. Эта асимметрия в такой же мере не затрагивает симметрии пространства, как ее не затрагивает существование химической стереоизометрии»¹⁾. (СтереоиЗОмерами называются вещества, молекулы которых при оди-

¹⁾ Л. Д. Ландау, ЖЭТФ, т. 32, в. 2, 1957, стр. 405.

наковом составе имеют различное пространственное строение. Это различие проявляется в различии физических и химических свойств веществ — стереоизомеров.)

Концепция Ландау приводила к заключению, что константы, характеризующие частицы и античастицы (массы и времена жизни), должны быть одинаковыми и что только истинно нейтральные частицы (т. е. такие, которые не имеют своих античастиц, например фотон) при комбинированной инверсии переходят сами в себя. Таким образом, в этой концепции внутреннего асимметрия частиц связывается с зарядом. Это означает, что определенному знаку заряда соответствует либо правая, либо левая асимметрия (соответственно правая и левая спиральность). Само же понятие четности имеет смысл только для частиц, тождественных со своими античастицами. Гипотеза Ландау, следовательно, вводит в теорию новый закон — сохранение комбинированной четности (*CP*) абсолютно нейтральной системы, который является следствием симметрии относительно двух одновременно проводимых инверсий — зеркального отражения и замены частиц античастицами.

Концепция асимметричных «винтовых» частиц приводит к новым представлениям о свойствах нейтрино и антинейтрино и о роли этих частиц в элементарных процессах¹⁾.

Драматическая ситуация, сложившаяся в физике в результате ниспровержения закона сохранения пространственной четности, после рассмотренных работ рассеялась. Ее позитивным вкладом явилось появление нескольких фундаментальных идей, существенно изменивших наши представления об элементарных частицах и симметрии в области микромира. Весьма важна методологическая сторона всей проблемы: решение было получено не на пути просто отказа от закона сохранения, а заменой его другим, более общим законом сохранения. Руководящая роль идеи сохранения и в этом случае себя полностью оправдала.

Развитие физики высоких энергий в последующие годы, казалось, подтверждало сохранение *CP*-четности

¹⁾ См., например, В. Паули, в сб. «Теоретическая физика 20 века», стр. 386.

и не предвещало появления коллизий, аналогичных той, что возникла в 1956 г. Но 1964 г. принес новые волнения. На Международной конференции по физике высоких энергий в Дубне группа американских экспериментаторов — Дж. Кристиансон, Дж. Кронин, В. Фитч и Р. Тёрлей — доложила результаты своих исследований распада нейтральных K -мезонов¹⁾. При этом они обнаружили такие аномалии, которые естественным образом можно было объяснить только несохранением CP -четности. По мнению Янга, «этот исключительно важный результат показывает, что слабые взаимодействия еще раз, в соответствии с характеристикой, данной некогда Нильсом Бором, оказываются сюрпризом для физиков. Несохрание CP приводит к новым сложностям в нашем понимании слабых взаимодействий, и мы должны детально изучить этот вопрос»²⁾.

Если этот эксперимент действительно указывает на несохранение CP -четности, то может возникнуть гораздо более драматичная ситуация, чем после исследований Ли и Янга, и прежде всего потому, что не будет полной уверенности в том, что во всех случаях будет сохраняться CPT -четность. Между тем теорема Паули — Людерса — Швингера о сохранении CPT имеет столь глубокие основания в современной теоретической физике, что ее нарушение будет связано с радикальным пересмотром наиболее фундаментальных представлений о пространстве, времени и симметрии. Уже отказ от закона сохранения комбинированной четности приводит к значительным трудностям, так как с этим связано и нарушение T -инвариантности — инвариантности относительно инверсии времени, что само по себе может привести к далеко идущим последствиям как в классической, так и в современной физике. Наш «здоровый смысл» отказывается воспринимать изотропию пространства-времени наряду с выделенностью направления оси времени.

Поскольку факт нарушения P -инвариантности был обоснован теоретически и экспериментально, есте-

¹⁾ Подробно см.: М. В. Терентьев, Распад $K_2 \rightarrow 2\pi$ и возможное несохранение CP -четности, УФН, т. 86, в. 2, 1965, стр. 231.

²⁾ УФН, т. 86, в. 4, 1965, стр. 650.

ственно, возник вопрос о причине этого нарушения. Как указывалось выше, мыслимы два пути объяснения несохранения четности. В отличие от рассмотренного выше, где асимметрия приписывается частицам, второй путь связан с изменением наших представлений о структуре самого пространства на малых длинах. Такой путь решения проблемы был, в частности, предложен советским физиком И. С. Шапиро вскоре после первых работ Ли и Янга (в январе 1957 г.). В статье «О несохранении четности при β -распаде» он писал: «Представляется интересным рассмотреть вопрос о несохранении четности с точки зрения изменения наших представлений о структуре пространства. Если исходить из этой точки зрения, то можно предположить, что структура пространства такова, что преобразование зеркального отражения в нем невозможно. Иными словами, понятий «правого» и «левого» в таком пространстве не существует... Это означает, что группа преобразований, переводящая пространство само в себя и оставляющая на месте одну точку, связана, т. е. не разбивается на два отдельных множества (вращения и отражения), как это имеет место в евклидовом пространстве. Мы будем называть такое пространство неориентируемым или односторонним. Поскольку в одностороннем пространстве отражения невозможны, проблема несохранения четности решается тривиальным образом: понятие четности перестает существовать»¹⁾).

Изложенная гипотеза, естественно, может относиться только к очень малым элементам длины пространства, поскольку нет ни одного факта, который поставил бы под сомнение евклидовость макроскопических областей пространства. Критерием неориентируемых участков микропространства могут служить расстояния, малые по сравнению с длинами, существенными для электромагнитных и сильных взаимодействий.

Характерная длина для последних имеет величину порядка 10^{-13} см. Таким образом, развитая концепция может иметь смысл только в том случае, если

¹⁾ УФН, т. 61, в. 3, 1957, стр. 328. См. также сб. «Философские проблемы физики элементарных частиц», М., «Наука», 1964, стр. 155.

окажется, что процессы слабых взаимодействий разыгрываются на расстояниях, меньших 10^{-13} см. На сегодняшний день никаких принципиальных возражений против подобной концепции нет. Однако следует иметь в виду, что, приписав асимметрию самому пространству, мы тем самым должны признать и его неоднородность и, следовательно, распрощаться с законом сохранения импульса, который является следствием именно однородности пространства. Отмечая этот факт, Шапиро говорит: «При движении частицы в таком пространстве происходило бы, говоря наглядно, рассеяние частицы на неоднородностях пространства, так, что имела бы место некоторая неопределенность в импульсе... Если, однако, считать, что свойства пространства не являются чем-то заготовленным заранее, так что частица вступает в это пространство „как съемщик в готовую квартиру“ (Вейль), но что, напротив, свойства пространства определяются протекающими в нем физическими процессами (как это, например, имеет место в общей теории относительности), то отмеченная выше неопределенность в импульсе будет проявляться только в процессах, в которых существенны слабые взаимодействия, в частности при распаде элементарных частиц, но не при их свободном движении или при сильных (ядерных) и электромагнитных взаимодействиях»¹⁾.

Мы видим, таким образом, что крушение только одного закона сохранения пространственной четности поставило перед физиками ряд проблем, в настоящее время еще далеко не решенных. Все же есть уверенность в том, что наиболее фундаментальные свойства пространства и времени, массы и энергии в области микромира могут быть поняты только на пути дальнейшего углубления концепции симметрия — инвариантность — сохранение.

«В XVII веке человек заглянул во Вселенную и был потрясен, обнаружив, что его Земля — это крохотный островок вещества, затерявшийся на окраине космоса. В нашем веке мы проникли в глубь вещества и нашли новый повод для смирения. Там, где мы рассчитывали обнаружить прочные кирпичи вещества,

¹⁾ УФН, т. 61, в. 3, 1957, стр. 329,

служащие материалом, из которого построен человек и окружающий его мир, происходило лишь беспорядочное возникновение и уничтожение мириадов недолговечных частиц вещества и призрачной субстанции волновых полей. Там, где мы надеялись встретить законы, дающие однозначные предсказания, господствовали законы вероятности, и на каждом шагу мы сталкивались с игрой случая: случай сделал некоторые частицы стабильными, по воле случая нейтрон оказался в состоянии жить вечно внутри ядра, случай избавил нас от угрозы аннигиляции с античастицами. И над этим хаосом и неопределенностью господствуют законы сохранения, которые ограничивают определенными рамками безудержную энергию Вселенной и делают возможным существование непостижимо сложного и сказочно стройного мира вокруг нас¹⁾).

Некоторые методологические и философские вопросы

В обзоре законов сохранения, действующих в физике микромира, мы не имели возможности коснуться всех вопросов теории элементарных частиц. Это и не входило в нашу задачу. По этому поводу только за последние годы появился ряд превосходных обзоров и монографий, написанных выдающимися учеными, как отечественными, так и зарубежными²⁾). Мы ограничимся лишь несколькими заключительными замечаниями относительно специфических законов сохранения в микромире.

Как неоднократно отмечалось на страницах этой книги, до настоящего времени физикам неизвестны какие-либо явления, в которых бы нарушался хотя бы один из классических законов сохранения. Это дает основание считать, что закон сохранения и превращения энергии, закон сохранения импульса, закон сохранения момента количества движения и закон сохранения электрического заряда, так же как и закон сохранения массы, можно считать законами сохранения, имеющими силу как в области макромира, так и

¹⁾ К. Форд, Мир элементарных частиц, стр. 306.

²⁾ См., например, В. Вейскопф и Л. Ван-Хов, УФН, т. 84, в. 2, 1964; Я. А. Смородинский, УФН, т. 84, в. 1, 1964.

в области микромира. Это—законы сохранения, имеющие максимальную степень общности.

Вместе с тем открытие Ли и Янга впервые показало, что наряду с общими законами сохранения существуют и законы сохранения с ограниченной сферой действия. Это — законы сохранения четности, изотопического спина и странности, которые выполняются не при всех видах взаимодействий. Открытие нарушений законов сохранения в некоторых явлениях микромира ставит по-иному вопрос об абсолютизации этих законов. Абсолютными оказываются не законы сохранения, а сама идея сохранения. Именно с таких позиций и подходит к этому вопросу Н. Ф. Овчинников: «Абсолютность принципов сохранения заключается не в том, что тот или иной принцип сохранения не вызывает сомнения в его общности и является абсолютно строгим на вечные времена, но в том, что любой общий принцип сохранения при его возможном нарушении в какой-либо области природы сменяется другим принципом, действующим в этой области. Можно сказать, что абсолютен не тот или иной конкретный закон сохранения, а абсолютна идея сохранения: ни одна область природы не может не содержать устойчивых, сохраняющихся вещей, свойств или отношений, и соответственно ни одна физическая теория не может быть построена без тех или иных сохраняющихся величин.

Уверенность в абсолютности принципов сохранения ведет нас к признанию необходимости строгой проверки всех известных законов, к возможности и даже неизбежности сомнения в их общности, если это будет диктоваться новыми неожиданными фактами развивающейся науки. Такого рода сомнение, если оно оправдывается, может лишь послужить началом развития новых направлений, новых физических теорий»¹⁾.

Если классическая физика знала только пять законов сохранения, то физика микромира насчитывает их более десяти. Это обилие законов сохранения в современной физике связано, с одной стороны, с тем, что закон сохранения является наиболее общим выражением большого количества экспериментальных

¹⁾ «Вопросы философии», т. 5, 1962, стр. 75.

фактов, а их в настоящее время только в области физики элементарных частиц имеется множество. С другой стороны, можно думать, что обилие законов сохранения связано с несовершенством наших знаний относительно процессов на элементарном уровне материи. В будущем, вероятно, окажется, что многие законы сохранения взаимосвязаны и являются следствием некоей еще более общей симметрии пространства и времени. Однако сейчас они выступают как независимые, и их изучение является основным направлением современных исследований.

Принципиально важной является связь законов сохранения микромира с принципами симметрии. То обстоятельство, что при этом некоторые законы сохранения оказываются приближенными, связано, видимо, с неполнотой наших знаний свойств симметрии на субмикроскопическом уровне. Связь законов сохранения со свойствами симметрии была открыта на всех структурных уровнях материи, начиная с макротел и кончая элементарными частицами. В микромире симметрия оказалась вездесущей. На атомном уровне симметрия проявляет себя в определенной структуре энергетических уровней атомов, в частности атома водорода; в ядерной физике — в виде зарядовой инвариантности; на уровне элементарных частиц — в виде ряда специфических законов сохранения. Связь законов сохранения с принципами симметрии является настолько фундаментальной, что ее можно считать наиболее полным выражением идеи сохранения как в макрофизике, так и в микромире.

Другой важной особенностью законов сохранения, особенно в философском плане, является их тесная связь с принципом причинности. Именно законы сохранения образуют тот фундамент, на котором зиждется причинно-следственная связь закономерностей природы. Они являются той внутренней цепью, которая обеспечивает логически закономерную связь между причиной и следствием. «Идея сохранения внутренне связана с идеей причинного характера процессов природы. В своей глубокой основе эти две идеи представляют собой лишь стороны принципа самодвижения материи. В самом деле, если материя неразрывна с движением, то движение, как и материя, неуничтожимо

и несоздаваемо. Но неразрывность материи и движения, или, иначе, самодвижение материи означает в то же время, что причина всех изменений лежит в самой материи, в ее внутренних законах... Постоянство действия причинно-следственных связей обеспечивается непреходящим характером законов сохранения»¹⁾.

Важно отметить и тот факт, что законы сохранения образуют тот фундамент, на котором основывается преемственность физических теорий. Действительно, рассматривая эволюцию важнейших физических концепций в области механики, электродинамики, теории теплоты, современных физических теорий, мы убеждались в том, что в этих теориях неизменно присутствуют либо одни и те же классические законы сохранения (энергии, импульса и др.), либо наряду с ними появляются новые законы, образуя тот стержень, вокруг которого и идет истолкование экспериментальных фактов. «Общность законов сохранения в старых и новых теориях является еще одной формой внутренней взаимосвязи последних»²⁾.

Мы указали здесь кратко лишь на некоторые аспекты связи законов сохранения с общими философскими проблемами. История развития идеи сохранения показывает, что эта связь весьма тесная и глубокая. Неудивительно поэтому, что философы, особенно материалисты, начиная с Ф. Энгельса, проявили большой интерес к идее сохранения как объекту философского и методологического анализа. Особенно глубокие и обстоятельные работы в этом направлении стали появляться в последнее десятилетие, когда выявилась тесная связь законов сохранения с наиболее общими свойствами материи, пространства и времени, с принципами симметрии.

Значительный вклад в разработку философской стороны законов сохранения и общей идеи сохранения внесли советские философы. Здесь прежде всего следует отметить Н. Ф. Овчинникова, в книге которого «Принципы сохранения» дан глубокий и всесторонний философский анализ идеи сохранения и ее

¹⁾ Сб. «Проблема причинности в современной физике», Изд-во АН СССР, М., 1960, стр. 186.

²⁾ Сб. «Философские проблемы физики элементарных частиц», Изд-во АН СССР, М., 1963, стр. 12.

связи с принципами симметрии¹⁾), а также работы А. Н. Вьяльцева²⁾), Ю. В. Скачкова³⁾), В. С. Готта⁴⁾), и других ученых.

Результатом развития законов сохранения в современной физике является выяснение той роли, которую играют сохраняющиеся величины в общих физических теориях. Это стало ясно уже вскоре после открытия закона сохранения и превращения энергии. Мы видели, что развитие таких фундаментальных теорий классической физики, как теория теплоты и теория электромагнетизма, стало возможным только благодаря этому закону. Распространение закона сохранения импульса на электромагнитные процессы было связано с пересмотром механистических концепций об электромагнитном поле и с развитием представлений о нем как о специфической форме материи. Особенно велика роль законов сохранения в современной физике микромира, в чем можно было убедиться на протяжении всей книги.

Таким образом, место законов сохранения в современной физической картине мира исключительно велико, и можно думать, что их роль будет возрастать по мере нашего продвижения в глубины материи.

¹⁾ Н. Ф. Овчинников, Принципы сохранения, Изд-во «Наука», М., 1966.

²⁾ А. Н. Вьяльцев, Дискретное пространство-время, Изд-во МГУ, М., 1965.

³⁾ Ю. В. Скачков, Развитие представлений физики об элементарных объектах в свете идей симметрии, «Вопросы философии», 1963, № 2, стр. 105.

⁴⁾ В. С. Готт, Симметрия и антисимметрия, М., 1965.

Гельфер Яков Матвеевич

Законы сохранения

М., 1967 г., 264 стр.

Редактор **В. И. Рыдник**

Техн. редактор **К. Ф. Брудно**

Корректор **О. А. Сигал**

Сдано в набор 19/XI 1966 г.

Подписано к печати 10/VI 1967 г.

Бумага 84×108/32, Физ. печ. л. 8,25.

Условн. печ. л. 13,86, Уч.-изд. л. 14,32.

Тираж 30 000 экз. Т-06972. Цена книги 43 к.

Заказ № 548.

Издательство «Наука»

Главная редакция

физико-математической литературы.

Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

Ленинградская типография № 2

имени Евгении Соколовой Главполиграфпрома

Комитета по печати при Совете Министров

СССР. Измайловский проспект, 29.