

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**ЭВОЛЮЦИЯ УЧЕНИЯ ОБ ЭНЕРГИИ**

(1847 — 1947)

Т. П. Кравец**1. ОТКРЫТИЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ**

Долго был путь человечества к установлению понятия об энергии и закона об её сохранении: оно то приближалось к истине, то удалялось от неё; оно с трудом создавало и уточняло количественные представления о теплоте, работе, температуре, потенциале; оно только постепенно разрабатывало методы измерения этих величин и с запозданием создавало самые единицы этих измерений — механических, тепловых, электромагнитных; оно на опыте, в муках бесплодных исканий «вечного двигателя», осознавало и интуитивно предвидело великий закон сохранения энергии. Начало сохранения движения прозревали Декарт, Ньютон, Ломоносов. У последнего сохранение движения составляло лишь часть, только один случай более общего и широкого физического закона сохранения. Конкретное выражение закона сохранения энергии принадлежит, как известно, Ю. Р. Майеру¹, Дж. П. Джуулу² и Г. Гельмгольцу^{3*}).

Если мы, обогащённые опытом и знанием протекшего с тех пор столетия, вчитаемся в творения членов этой триады, то убедимся в существовании некоторого различия в понимании открытого закона у Майера, с одной стороны, и у Джуула и Гельмгольца — с другой. Последние оба являлись ревностными сторонниками механической доктрины, ведущейся ещё от Гейгенса; для них все явления скрытым образом суть явления механические, объясняются механическими силами и должны трактоваться механическими методами; Джуул при этом имеет в виду преимущественно явления теплоты, и многочисленные его высказывания по этому вопросу подтверждают его убеждение в кинетическом её характере. Гельмгольц уже в первой своей брошюре распространяет свои воззрения и методы исследования на все явления природы.

В противоположность этим двум авторам Майер нигде не обмолвился ни одним словом о механическом характере всех физических

*) Историю этого открытия в весьма кратком виде см. в нашей статье: в «Физике в школе» за 1947 г.

явлений. Для него энергия (или «сила», как они писали все трое) испытывает многообразные превращения, проявляясь то в виде механической, то в виде тепловой, то в других ещё видоизменениях. Бесплезно было бы искать в эти ранние годы учения об энергии более точных высказываний — у самих авторов учения об энергии оно ещё не отлилось в более определённые формы. Но теперь, через столет, охотно укладывают всю гамму развившихся далее противоречивых воззрений в наметившуюся уже в первые годы учения противоположность высказываний одной стороны и умолчания другой.

2. ЗАТРУДНЕНИЯ В ПОНИМАНИИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

Отметим, что у «механистов» с самого начала учения о сохранении энергии возникло некоторое затруднение теоретического характера. В сущности, в механике совершенно наглядным является только один из видов энергии — энергия кинетическая (или, на первых порах, «живая сила»). Как только мы формулируем понятие об энергии потенциальной («напряжённая сила» у Гельмгольца), мы попадаем в строй мыслей, ведущих нас прочь от механики. В самом деле, если потенциальная энергия есть работа, затраченная на сообщение системе данной конфигурации, а элементарная работа равна скалярному произведению длины элементарного участка на силы, действовавшие на этом участке, то является необходимость обосновать эти силы, — и эта необходимость уже в простейшем случае приводит нас к неразрешимым, или во всяком случае, не разрешённым вопросам: что такое силы тяготения, действующие между небесными телами? тяжесть, притягивающая земные тела к центру земли? силы упругости, которыми одно тело действует при соприкосновении с другим телом, и вообще все силы молекулярного происхождения? все силы, проявляющиеся в электромагнитном поле? и, наконец, пока ещё не раскрытые «ядерные силы», отлагающие в недрах атома неисслезанные прежде запасы готовой к использованию энергии? — Конечно, чтобы объяснять что-нибудь, мы должны какое-нибудь явление признать за простейшее, а прочие явления свести к этому простейшему. Но в зависимости от уровня наших знаний мы в разные времена признаём простейшими от одних, то другие явления и должны, сообразно этому, переделывать логическое построение всего здания нашей науки — и мы, действительно, были неоднократно свидетелями таких перестроек за время жизни одного только поколения учёных. Но это значит, что самое понятие потенциальной энергии не принадлежит к простым понятиям. Нельзя ли совсем обойтись без этого понятия?

3. РАБОТА Н. А. УМОВА «ТЕОРИЯ ПРОСТЫХ СРЕД»

Замечательную попытку такого рода мы видим в одной из работ нашего соотечественника Н. А. Умова⁴. Написанная в 1871 г., т. е. на сравнительно ещё очень ранней стадии учения об энергии, она

как раз отражает некоторую философскую неуспокоенность, существовавшую у учёных того времени, задумывавшихся о самых основах этого учения и, в частности, об энергии потенциальной. Автор отвергает это понятие и старается его устранить из физики, вводя предположение, что количество кинетической (или, как он пишет, динамической) энергии в природе остаётся постоянным; если же нам кажется, что запас её уменьшился (другими словами, перешёл в потенциальную энергию), то это только видимое уменьшение, так как на самом деле, по мнению Н. А. Умова, потенциальная энергия есть кинетическая энергия другой среды, которая остаётся скрытой. П. П. Лазарев⁵, излагая учение Умова, пользуется такой наглядной иллюстрацией: газ, находящийся при большом давлении под поршнем, обладает некоторым количеством видимой потенциальной энергии. Но эта потенциальная энергия есть на самом деле кинетическая энергия молекул газа — среды, внутренние движения которой остаются для нас незаметными. Вряд ли мы сейчас пойдём с лёгкостью по пути признания скрытых сред. Но напомним, что скрытые массы дожили до 1891 — 1894 гг., когда они фигурируют в «Принципах механики» Г. Герца, знаменитого автора «Исследований о распространении электрической силы». Самая же мысль Н. А. Умова о сведении потенциальной энергии к кинетической и ныне заслуживает глубокого внимания. Мы видим в его попытке явное доказательство того, что логический строй нашего физического мировоззрения не может обойтись одним понятием о кинетической энергии, а нуждается в дополнительных положениях чисто физического характера — например, в гипотезах о природе тех или иных сил и т. п. Тут кроется та причина, которая позже привела к гибели всё механистическое воззрение, несмотря на его огромные успехи и завоевания^{*)}. Отдадим должное проницательности нашего замечательного соотечественника, который сумел на столь ранних стадиях учения об энергии, когда оно развивалось на чисто механистической основе, усмотреть слабые стороны последней и сделал попытку избежать грозящей ей опасности.

4. ВОПРОС О ЛОКАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГИИ

Чрезвычайно важный момент своего развития пережило представление об энергии, когда физикам пришлось задуматься над вопросом о локализации энергии. Дадим пример: мы взяли проволоку и, наперекор действующим между её частицами упругим силам, растянули её грузом P на длину l . Тогда можно написать выражение для работы, нами при этом совершённой; она равна $P \cdot l$. В этом выраже-

^{*)} Мы не считаем своей задачей изложение успехов кинетических представлений. Второй закон термодинамики, истолкованный статистически в трудах Больцмана, Смолуховского, Эйнштейна — вот главные завоевания в этой области.

нии фигурирует наряду с приложенным к концу проволоки грузом P , только вызываемое им удлинение проволоки l . Однако легко привести это выражение к другому виду, пользуясь уравнением для удлинения:

$$l = \frac{PL}{qE}$$

(L — первоначальная длина проволоки, q — поперечное сечение, E — характерный для материала проволоки коэффициент, так называемый модуль Юнга). Подстановкой легко получим:

$$A = \frac{1}{2E} \left(\frac{P}{q} \right)^2 qL.$$

В этом выражении qL — объём проволоки, и оно показывает нам, что работа распределилась по всему объёму проволоки равномерно; на единицу объёма приходится количество энергии

$$\frac{1}{2E} \left(\frac{P}{q} \right)^2,$$

где $\frac{P}{q}$ — «натяжение», т. е. сила, действующая на единицу площади сечения проволоки.

Итак, энергия распределилась с некоторой плотностью в равномерно растянутой проволоке.

Другой пример, который нам понадобится в дальнейшем, представляет электростатическая энергия. Известно, что если мы хотим зарядить находящийся в пустоте изолированный металлический шар радиуса R количеством электричества e , то мы должны для этого затратить работу

$$\frac{e^2}{2R}.$$

Максвелл⁶, руководствуясь основными воззрениями Фарадея, показал в своём «Трактате» (1873), что мы получим ту же величину, если представим себе электростатическую энергию не сосредоточенной на поверхности проводника, а распределённой во всём безграничном пространстве по закону

$$w = \frac{E^2}{8\pi},$$

где w — плотность энергии (количество энергии в единице объёма), E — электрическая напряжённость в данной точке. Она равна для всех точек вне шара

$$\frac{e}{r^2},$$

а внутри шара — нулю. Расчёт показывает, что при таком предположении общее количество энергии в поле заряженного шара равно вышеуказанной величине

$$\frac{e^2}{2R}.$$

Энергия расположена концентрическими шару слоями равномерной плотности; за сферой радиуса nR лежит n -ная часть всей энергии; энергия «жмётся» к поверхности шара, довольно быстро убывая с расстоянием от центра шара.

Полезно указать, что вокруг шара, расположенного не в пустоте, а в другой среде, плотность энергии будет не $\frac{E^2}{8\pi}$, а $\frac{\varepsilon E^2}{8\pi}$, где ε — так называемая диэлектрическая постоянная среды — её характерная константа, открытая Фарадеем⁷.

Подобным же образом ставятся и решаются вопросы о локализации других видов энергии. Например, для магнитной энергии мы получаем аналогичное выражение для плотности энергии:

$$w_m = \frac{H^2}{8\pi} \quad (H — \text{магнитная напряжённость}).$$

5. О ДВИЖЕНИИ ЭНЕРГИИ. ТЕОРЕМЫ УМОВА И ПОЙНТИНГА

Следующей стадией в уточнении понятия об энергии является постановка вопроса об её движении. Самое возникновение этого вопроса с современной точки зрения вполне понятно. Возьмём, например, явление согревания Земли Солнцем. Солнце вырабатывает в своих недрах непостижимо громадные запасы тепловой энергии. Не касаясь пока что вопроса об источниках этой энергии, обратим внимание на то, что часть её в конце концов оказывается на поверхности Земли. Ясно, что она должна была пройти через пространство разделяющее эти небесные тела, а значит, возникает вопрос о путях и законах этого движения энергии в пространстве и во времени. Повторяем, что сейчас этот строй мысли представляется даже тривиальным. Но необходимо иметь в виду коренное различие между современными взглядами на энергию и теми неопределёнными представлениями о ней, которые господствовали в научных книгах в 70-е годы, когда эта задача возникла. Следует с законной национальной гордостью отметить, что впервые поставил и решил задачу тот же Н. А. Умов, тогда ещё двадцативосьмилетний доцент Новороссийского (т. е. Одесского) университета; он сделал это в знаменитой своей работе о движении энергии⁸. Уже в цитированной выше работе «Теория простых сред» и в других последовавших за ней, он вскользь касается этого вопроса, создавая даже термин: «токовая» энергия. Теперь же он занимается ею специально для важного случая упруго-деформированного тела*) и приходит к фундаментальному выводу: энергия течёт вдоль луча, т. е. по направлению распространения деформации; поток энергии, т. е. количество её, протекающее в единицу времени через единицу площади, численно равно давлению

*) Когда работа писалась, в науке ещё безраздельно господствовала упругая теория света, и формулы Умова находили применение в оптике. Ныне они сохраняют приложимость в акустике.

в соответственной точке пространства, помноженному на скорость распространения деформации в данной среде. Мы называем эту изящную теорему теоремой Умова.

Чтобы понять всё значение вывода Умова и строя его мыслей вообще, расскажем несколько фактов, связанных с этой работой. Последнюю он представил как докторскую диссертацию в Московский университет — и здесь едва не потерпел неудачи; во всяком случае он выслушал от своих оппонентов — официальных и неофициальных — много страстных и горьких упреков. А этими оппонентами были выдающиеся московские профессора: А. Г. Столетов, сам крупный и тонкий учёный, признанный тогда старейшина русской физики; А. Ф. Слудский и В. Я. Цингер — математики с большим именем и авторитетом. В чём же эти учёные, пользовавшиеся уважением и самого Н. А. Умова, упрекали молодого диспутанта? — Они сразу ощутили в его работе новую и, как им казалось, еретическую струю*). Ересь эта заключалась в том, что автор развивал недостаточно, по их мнению, мотивированное воззрение, что энергия представляет собой нечто, как тогда говорили, субстанциальное. Между тем, говорили оппоненты, пока доказано только одно: сумма энергий разных видов остаётся постоянной во всех явлениях, происходящих в изолированной системе. Но это свойство принадлежит многим математическим функциям, и отсюда нельзя делать вывода об их физическом существовании. С точки зрения математика такая точка зрения понятна: ведь ещё Лагранж в своей аналитической механике писал выражение

$$T + V = H,$$

где в наших терминах T является кинетической энергией, V — потенциальной, а их сумма H — постоянной величиной¹¹. Это — так называемый у механиков математического уклона «интеграл живых сил», и никакого физического смысла вкладывать в него они не привыкли. Даже термина «работа», необходимого для физического обоснования понятия «потенциальная энергия», до Понселе не существовало, уже не говоря об энергии вообще; V — это некоторое математическое выражение «потенциальная функция». И вот их, привычных к этим терминам математиков, хотят уверить, что эти математические понятия, эти интегралы имеют физическое существование, что они размещены в пространстве, текут и пр. и пр. Думается, что здесь сказана присущая учёным той эпохи настороженность по отношению к новым гипотезам и теориям, в особенности в случаях, когда они представляли собой более или менее широкое обобщение — отголосок затянувшейся борьбы естествоиспытателей с натурфилософами-шеллингианцами.

*) Мы знаем эти факты по изустной традиции, но находим их также в биографических очерках А. И. Бачинского⁹ и П. П. Лазарева¹⁰.

6. ЭНЕРГИЯ — СУБСТАНЦИЯ

Мы видим, таким образом, что именно в те годы — 75 лет тому назад — в умах передовых физиков созревала мысль о субстанциальности энергии. Ход их рассуждений повторил собой то, что в восемнадцатом столетии произошло с понятием о теплоте: то, что распределяется между телами, усваивается ими, переходит от одного к другому и при этом сохраняется всегда в неизменном количестве — это постепенно приобретает в глазах заинтересованных работников «предикат субстанциальности», становится физической сущностью особого рода. Теперь мы знаем, что сторонники «тепло-рода» были неправы, были поспешны в своих заключениях. Пока что учение об энергии как субстанции не поколеблено никакими позднейшими данными или доводами *). Напротив, как мы увидим, оно ещё укрепилось со временем и стало безраздельно господствующим. Причины этого вскроются в дальнейшем изложении.

Скажем несколько слов о дальнейшей судьбе умовского представления о потоке энергии. Оно было (повидимому, совершенно независимо) в 1884 г. применено Пойнтингом¹² к электромагнитному полю. Пойнтинг показал, что через единицу площади в единицу времени проходит поток энергии

$$S = \frac{c}{4\pi} [\mathbf{E} \times \mathbf{H}],$$

где $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ — электрическая и магнитная напряжённости в месте потока, c — скорость света. Нетрудно показать, что эта формула при пересчёте на простой случай плоской волны тождественна с высказыванием Умова. Теорема Пойнтинга является предметом школьного обучения, а имя Умова, его предшественника, незаслуженно забыается...

Независимо от этого, рекомендуем каждому любителю истории нашей науки перечитать Пойнтинга в подлиннике. Кроме чисто эстетического наслаждения, которое при этом получаешь, легко убедиться при чтении, какой успех за 10 лет (1874 — 1884) сделала идея о субстанциальности энергии.

В этой связи необходимо остановиться на тех шатаниях, которые обнаружились в умах целого поколения физиков и других учёных, задумывавшихся над новой вошедшей в науку субстанцией — энергией.

Прежде всего это новое понятие использовали философы-идеалисты. Они обратили внимание на то, что создавшийся в физике известный дуализм чем-то напоминает их диадку — материи и

*) Обратим внимание на то, что понятие об энергии как субстанции отсутствует в основоположных работах Майера, Джуула и Гельмгольца. И в значительно более поздней речи последнего (1871) „О возникновении планетной системы“ он говорит только о „запасе работы во вселенной... неразрушимом, не могущем увеличиться, вечном и неизменяемом как материя“ — (курсив наш — Т. К.) и ничего больше.

духа. Материя — инертная, дух — активная субстанция. А когда в дальнейшем в физике обнаружилась, как полагается, борьба между двумя стоящими рядом субстанциями за титул главной и основной и когда победа начала склоняться на сторону энергии, поднялся прямо торжествующий вопль: физики сошли со своей традиционной материалистической позиции и переходят к спиритуализму!

Конечно, за такой вывод нельзя делать вполне ответственными физиков; несомненно, что выяснение свойств энергии и относящихся к ней законов шло, прежде всего, по линии исследования и накопления фактов.

Однако некоторые идеологические ошибки были и у физиков; к числу их относится так называемая «энергетика». Под таким именем слыла в своё время — не физическая, в собственном смысле, а натурфилософская — система, восходившая корнями к Рэнкину, а главными глашатаями имевшая Гельма и В. Оствальда. Они многократно прокламировали и, можно сказать, рекламировали свою систему; их настойчивость вызвала не раз весьма авторитетные отповеди, прежде всего, со стороны Людвига Больцмана. У нас против них высказывался, между прочим, А. Г. Столетов¹⁵. Прочитывая сейчас произведения энергетиков, поражаешься, с каким малым багажом они выходили на научную арену. Даже в тех случаях, когда их высказывания близки к современным взглядам, легко убедиться в том, что у них они остаются абсолютно не обоснованными; не стоя ни в какой связи с экспериментальными фактами, они остались совершенно в стороне от дальнейших успехов физики. Справедливый приговор энергетике дан в замечательной книге В. И. Ленина «Материализм и эмпириокритицизм».¹⁶

Роль Вильг. Оствальда*) заслуживает особого внимания. Независимо от своих собственных научных работ (они оставили достаточно осязательный след в науке) он связал своё имя с горячей защитой Аррениусовской теории электролитической диссоциации, специально для этого основав журнал «*Zeitschrift für physikalische Chemie*». Как он совмещал вражду к молекулярной теории с проповедью распада молекул, понять совершенно невозможно. К «энергетике» его привела ненависть к механическим воззрениям. Впрочем, многие химики были их противниками — и по вполне понятным причинам: именно для химии механические теории почти ничего не сумели дать.

7. ОБ ИНЕРТНОЙ МАССЕ ЭНЕРГИИ

К восьмидесятым годам относится выяснение ещё одного важного свойства энергии: движущееся тело, которому сообщено некоторое количество энергии (всё равно, какой), ведёт себя при попытках

*) Он начал научную карьеру в Дерпте и Риге, но впоследствии уехал в Германию (Лейпциг) и сделался ярким руссофобом. Особенно он проявил себя как таковой во время первой мировой войны.

ускорить или замедлить его движение так, как если бы его инертная масса испытала прирост. Этот прирост пропорционален запасу энергии тела.

Эта замечательная истина вначале высказывалась только относительно электрического заряда. Уже давно было замечено, что электрический заряд обладает чем-то подобным инерции. Эта мысль приходила уже в 1834 г. Фарадею в связи с его опытами по самоиндукции¹³, но он её отбросил. Основанием её является тот факт, что при попытках увеличить ток в проводе, его несущем, возбуждается ток противоположного направления; наоборот, при ослаблении тока в проводе индуцируется ток прямого направления. Здесь, однако, дело маскируется влиянием формы проводов, что и сбило Фарадея. В более простых случаях позднейшие учёные неоднократно возвращались к мысли об этой «электрической инерции». Но первым, кто остановился на ней более внимательно и усмотрел в явлении нечто более глубокое, чем простую аналогию, был Дж. Дж. Томсон — впоследствии знаменитый руководитель Кембриджской лаборатории, а тогда, в 1881 году, ещё молодой учёный. Он вычислил¹⁴, что будет с металлическим шаром радиуса R , если его зарядить количеством электричества e . Можно рассуждать так: шар, при движении со скоростью v , обладает кинетической энергией

$$m \frac{v^2}{2},$$

где m — масса шара.

Если шар несёт на себе заряд, то его движение представляет собой некоторый ток; величина этого тока i пропорциональна величине переносимого заряда и скорости движения

$$i \sim ev \text{ или } i = Aev.$$

Вокруг тока образуется магнитное поле, напряжённость которого H в каждой точке пропорциональна силе тока, т. е.

$$H \sim ev \text{ или } H = Bev.$$

Наконец, плотность магнитной энергии в каждой точке даётся выражением (см. выше § 4)

$$w_m = \frac{H^2}{8\pi}.$$

Подставив сюда вместо H его выражение, получим

$$w_m = Ce^2v^2$$

и подобное же выражение для суммы всей магнитной энергии, находящейся вокруг движущегося заряженного шара

$$W_m = De^2v^2.$$

Сумма кинетической энергии шара и его магнитной энергии будет

$$T' = \frac{m}{2}v^2 + De^2v^2,$$

что можно представить так:

$$T' = \frac{v^2}{2} (m + 2De^2) = \frac{v^2}{2} (m + m').$$

Результат имеет такой вид, как будто бы масса m увеличилась благодаря присутствию заряда на величину m' .

Томсон вычислил коэффициент D в упрощающем предположении, что скорость движения v мала по сравнению со скоростью света c . Тогда для добавочной (так называемой электромагнитной) массы получается выражение

$$m' = \frac{2}{3} \frac{e^2}{Rc^2}.$$

Томсон осторожно называет эту величину «кажущимся приростом массы».

На первых порах было обращено внимание на то, что величина эта очень мала из-за огромного множителя c^2 в знаменателе; заметить её можно только при очень малых величинах R и больших зарядах e . Но мы напишем её несколько иначе, а именно:

$$m' = \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{c^2} \cdot \frac{e^2}{2R},$$

и вспомним, что $\frac{e^2}{2R}$ есть электростатическая энергия заряженного шара. Тогда мы получим, что кажущийся прирост массы шара измеряется электростатической энергией его заряда, делённой на квадрат скорости света*).

На первых порах этому выводу было придано только ограниченное значение: по ходу его казалось, что он имеет отношение только к электрическому заряду; поэтому часто называли добавочную массу «электромагнитной». И трактовали её именно как добавочную к основному члену истинной инертной массы.

Более общее значение понятие об электромагнитной массе получило в самом конце XIX века, когда, с одной стороны, в теоретических работах Г. А. Лоренца было предположено, а, с другой стороны, на опытах Томсона, Кауфмана, Ленарда, Симона и других

*) Мы не будем здесь выяснять происхождение множителя $\frac{4}{3}$ и займёмся этим вопросом несколько позже.

выяснилось существование электронов — частиц с массой, которая меньше массы атома водорода круглым числом в 1800 раз, а заряд равен по абсолютной величине заряду иона водорода. Относительно этой предельно лёгкой частицы как-то сразу явилось подозрение, что она не обладает истинной инертной массой, а что вся её масса — электромагнитного происхождения.

Мы не будем излагать всего исторического хода вопроса. Все существовавшие к тому времени теории предсказывали, что масса электрического заряда будет зависеть от его скорости (формула Дж. Дж. Томсона, указанная выше, выведена была в упрощающем предположении, что скорость вообще мала — подразумевается, по сравнению со скоростью света), но различные теории предсказывали различную зависимость, так как их авторы делали различные предположения о поведении электрона при движении. Абрагам предполагал, что электрон представляет собой неизменяемое твёрдое тело. Лоренц думал, что электрон при быстром движении сокращается в направлении движения, превращается в сжатый в продольном направлении эллипсоид.

В опытах с быстрыми электронами хотели найти подтверждение той или иной теории, а кстати, решить важный для нас вопрос: вся ли масса электрона является электромагнитной? Думали, что только электромагнитная масса является переменной при изменении скорости, а истинная масса остаётся неизменной. Из опытов, казалось, можно было вывести, что электрон ведёт себя ближе всего к теории Лоренца и что вся его масса — электромагнитного происхождения. Но впоследствии, как мы увидим, этот вывод лишился своей доказательной силы.

Вначале, как мы уже указывали, было обращено мало внимания на то, что в выражении для электромагнитной массы электрического заряда стоит энергия заряда. Но несколько позже молодой венский учёный Газенэрль нашёл новый случай, когда должна проявляться такая же кажущаяся масса. Он воображает себе некоторый цилиндр, внутри отполированный и — в теории это бывает — целиком отражающий все падающие на его внутренние стенки лучи. Представим себе, что мы на ничтожный промежуток времени открыли небольшое отверстие и впустили во внутрь цилиндра пучок света, а отверстие сейчас же быстро закрыли. Попавшая в ловушку лучистая энергия уже не может выйти наружу, так как стенки целиком отражают её, но она не может и поглотиться веществом цилиндра; она осуждена вечно ходить между стенками цилиндра во всевозможных направлениях. Опыт этот, конечно, относится к числу вообразимых.

Незадолго до рассуждений Газенэрля наш соотечественник, учитель многих московских физиков Пётр Николаевич Лебедев, произвёл во всём научном мире сильнейшее впечатление, впервые сумев доказать, что лучи света, падая на препятствие, преграждающее им путь,

производят на него давление. Изящные и по своему времени труднейшие опыты Лебедева в своих количественных выводах совпали с предсказанием теории Максвелла; а именно, давление на единицу площади препятствия численно должно равняться плотности световой энергии в пространстве, прилежащем к препятствию. Лебедев получил результаты, отличающиеся от теории не более, чем на 20%. Всякому знакомому с техникой эксперимента физику было ясно, что опыты Лебедева стояли вообще на грани возможности исполнения, а достигнутая им точность — верх достижимого в то время совершенства. Весь мир признал существование светового давления доказанным, а найденную величину — совпадающей с теоретическими предсказаниями Максвелла.

Газенэрль, наверное, также был под общим впечатлением доказанности сил светового давления и сделал их существование основой для рассуждений о своём воображаемом опыте. Итак, предположим вместе с автором, что мы толкнём цилиндр; он получит, как учит механика, некоторое ускорение. От этого у того конца цилиндра, который находится сзади, лучистая энергия сгустится; наоборот, у переднего конца она окажется относительно разреженной. Но густая энергия по Максвеллу — Лебедеву будет давить на прилежащую (заднюю) стенку сильнее, а более редкая (у передней стенки) — слабее. Создаётся некоторая добавочная сила, действующая в сторону, противоположную нашему толчку. Ускорение цилиндра уменьшится, как если бы его масса увеличилась. Эти качественные рассуждения Газенэрль сумел облечь в форму математически-строгих выводов — довольно-таки, нужно сознаться, сложных. Они нас не будут интересовать, но результат представит для нашего предмета чрезвычайную важность: по Газенэрлю добавочная или кажущаяся масса, которую приобретёт цилиндр, имеет такое выражение:

$$m' = \frac{4}{3} \frac{\mathfrak{E}}{c^2},$$

т. е. по виду тождественное с тем, которое мы получили для случая электростатической энергии.

После этого уже нельзя отмахиваться, как от частного, от факта, что энергия, сосредоточенная в каком-либо теле, увеличивает его массу; возникает дальнейший вопрос, в какой мере вся инертная масса тела, нами наблюдаемая при действии на него сил, сводится к такой энергетической массе. Об этом — несколько позже, но заметим ещё, что электромагнитная теория, в особенности её видоизменение, данное Лоренцом в его электронной теории, позволяет в весьма общей форме указать, что в величину «кажущейся» массы сопоставляет свой вклад не только собственно электромагнитная энергия, но и работа, затраченная электромагнитными силами и, значит, перешедшая в другие виды энергии; не только электростатическая,

но и магнитная, тепловая, световая, упругая, химическая, — короче, всякая энергия, сообщённая телу, повышает в соответственном размере массу тела.

Остановимся на двух-трёх частных примерах: 1) Выше мы видели, что энергия электростатического заряда (а, значит, в частности, и элементарного заряда — электрона) сосредоточена в пространстве вокруг заряда, постепенно убывая от поверхности заряженного тела к удалённым от него частям пространства. Значит, и масса заряда распределена во всём пространстве; масса электрона (т. е. и самый электрон!) не сосредоточена в какой-либо малой области радиуса около $3 \cdot 10^{-13}$ см, а размазана во всём пространстве. Мы видим, что понятие о «размазанности» электрона существовало гораздо раньше, чем его развила — конечно, в совершенно иных размерах — современная квантовая теория с её «принципом неопределённости».

2) Хочется сказать несколько слов о том коэффициенте $\frac{4}{3}$, который фигурирует в выражении «кажущейся» массы и электростатического заряда, и лучистой энергии. На примере последней вопрос разрешается очень легко: чтобы создать полость, наполненную лучистой энергией, нужно: а) расширить полость, работая против сил светового давления; работа давления равна $v \frac{s'}{3}$ (s' — плотность энергии, v — объём полости); б) наполнить полость энергией той же густоты, для чего потребно $s'v$ лучистой энергии, всего $\frac{4}{3} s'v = \frac{4}{3}$ той энергии, которая содержится внутри полости. Вот откуда берётся множитель $\frac{4}{3}$. Общим же выражением для массы будет

$$m = \frac{s'v}{c^2}.$$

3) Очень трудным является вопрос об инертной массе кинетической энергии. На это обратил внимание и В. И. Ленин *). Можно спасти положение, обратив внимание на то, что, например, кинетическая энергия движущегося заряда представляет собой, собственно говоря, как мы видели выше, энергию магнитного поля, образующегося вокруг электрона. Ассоциировать представление об инерции с полем (напряжением по линиям сил и т. п.) уже значительно легче.

4) И, наконец, последнее замечание. Мы ничего не знаем о «свободном эфире» — о пустом пространстве, находящемся между взаимодействующими телами. Мы начинаем ощущать разнообразные действия этого «поля», когда вносим в него какое-либо тело: наэлектризованный шарик, зеркальную полость и т. п. В случае последней мы видим, собственно, не инерцию заключённой внутри её лучистой

*) См. В. И. Ленин, «Материализм и эмпириокритицизм», раздел 3 главы V.

энергии, а изменение инерции полости. В случае заряженного шарика мы видели изменение его инерции, а не инерцию связанной с ним энергии. Не делаем ли мы логического скачка, отождествляя результат нашего исследования инерции с энергией, появляющейся в наших формулах? В настоящий момент мы считаем такой способ действия наиболее естественным, а его результаты — дальнейшую субстанциализацию энергии — наиболее правдоподобным решением вопроса об основной субстанции в природе. Но если когда-либо это учение заведёт нас в тупик, в который не раз попадало естественно-научное мировоззрение в поисках особо широких обобщений, — в этом случае именно здесь можно будет искать выхода из создавшихся трудностей.

8. ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ

Собственно, говорить о дальнейшем развитии не совсем правильно — тот круг идей, о котором мы хотим говорить далее, создавался параллельно вышеизложенному. Дело идёт о передаче радиацией не только энергии (например солнечной теплоты), но и сил, и возникает вопрос, стоящий в связи с конечной скоростью радиации. Положим, что некоторое количество лучистой энергии оставило Солнце и устремилось на Землю. Через 500 секунд (круглым числом) она достигнет поверхности Земли и произведёт на неё давление. С точки зрения механики сейчас же необходимо поставить два вопроса:

Остаётся ли при этом справедливым основной закон динамики — закон равенства действия и противодействия? То-есть, иными словами: давит ли радиация также и на Солнце — в тот момент, когда его оставляет? И второй вопрос: как этот закон остаётся справедливым, если первое действие отделено от второго на чувствительный промежуток времени — в описанном случае на целых 500 секунд (больше восьми минут)?

Эти вопросы ставились свыше пятидесяти лет тому назад — ещё в девяностые годы прошлого века. В упомянутой нами книге Дж. Дж. Томсон¹⁴ мы можем найти упоминание о них на стр. 9. К количественной стороне вопроса (там она разобрана) мы ещё вернёмся. С качественной стороны они решаются так: мы называем, с точки зрения 2-го закона Ньютона, силой, с которой одно тело действует на другое, то количество движения, которое первое тело отдаёт второму в единицу времени.

$$f = \frac{\Delta (mv)}{\Delta t},$$

где $\Delta (mv)$ — отданное количество движения, Δt — малый отрезок времени, в течение которого отдача осуществляется. Итак, если мы хотим, чтобы законы механики продолжали действовать в случае

излучения, нужно, чтобы излучающее тело отдавало некоторое количество движения. Проще всего предположить, что оно — это количество движения, отдаётся вместе с лучистой энергией и переносится вместе с нею, т. е. попросту, ею же. Тогда мы придём к заключению, что лучистая энергия одарена некоторым количеством движения. Отсюда один шаг до признания, что она одарена массой. Вот новый подход к той идее, которая развивалась выше.

Количественная сторона вопроса решалась, как сказано, уже Томсоном, но не до конца. Он курьёзным образом остановился на пол-дороге, отметив только, что количество движения переносится в том же направлении, как и энергия. Теперь мы можем написать и более содержательное уравнение:

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

где g — плотность переносимого количества движения, S — поток энергии (см. выше), c — скорость света. Мы видим, что между двумя интересующими нас величинами существует не только такая связь, что они распространяются по одинаковым направлениям — они просто пропорциональны одна другой.

С точки зрения вектора количества движения вопрос о взаимодействии между Солнцем и Землёю интерпретируется так: отдавая лучистую энергию, Солнце отдаёт и эквивалентное количество движения; при этом оно испытывает «отдачу», т. е. силу давления в сторону, противоположную отданному потоку. Количество движения не пропадает — оно переносится вместе с лучистой энергией, доходит до поверхности Земли и отдаётся последней. Итак, закон сохранения количества движения соблюдён.

В таком виде вопрос поставлен и решён недавно скончавшимся М. Планком в 1908 г.¹⁷ В не менее общем виде он был сформулирован Лорентцем в его первой книге, излагавшей его электронную теорию¹⁸, и М. Абрагамом, применившим понятие об «электромагнитном количестве движения» для решения вопроса об уравнениях движения электрона¹⁹.

Существование этого электромагнитного количества движения, распределённого по объёму, несколько усложняет рассмотрение вопроса о световом давлении. Как известно, сам предсказавший это давление Максвелл вывел его очень нестрогими рассуждениями, предположив, что электрические и магнитные силы, действующие в световой волне, дают в эфире такие же напряжения, как в статическом, т. е. неизменном поле. Между тем в световых волнах они изменяются сотни миллиардов раз в секунду. Понадобился новый вывод сил светового давления, но он дал утешительный результат: в периодических волнах переносимое ими количество движения выражается также периодической функцией; у такой периодической функ-

ции изменение за целый период или за целое число периодов равно нулю — вывод Максвелла для периодических процессов можно производить так, как если бы никакого электромагнитного количества движения не существовало.

В связи с этим нельзя не вспомнить об участии одной замечательной работы нашего соотечественника, профессора Юрьевского университета А. И. Садовского²⁰. Он в начале 90-х годов написал исследование о вращательных усилиях, которые лучи света должны производить на кристаллическую пластинку («эффект Садовского») и на вращающую плоскость поляризации и поглощающую пластинку. В начале своей книги А. И. Садовский, следуя строгому обычаю прежних лет, выписал те необходимые предположения, которые нужно сделать для дальнейших выводов. А в числе этих предположений значится: «Быстрые переменные световые поля действуют так же, как статические». Работа А. И. Садовского, — может быть, именно из-за этой его «чрезмерной» добросовестности, — не имела успеха, как диссертация... Лишь позднее правильную оценку дал ей живший тогда в России П. С. Эренфест.

9. ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Мы намеренно излагали всё предшествующее без упоминания о теории относительности, чтобы показать, что весь тот круг идей, который сложился в физике по вопросу об энергии и её механических атрибутах, возник и развивался независимо от теории Эйнштейна. Отрицать это не станет ни один достаточно эрудированный физик, если справится просто с хронологией. Но все эти вопросы подняла со своей точки зрения и теория относительности — и решила их с необыкновенной простотой и лёгкостью, исходя только из своих основных принципов, не делая никаких добавочных гипотез — не пользуясь, например, основаниями максвелловой и лорентцевой электродинамики. Как известно, теория относительности произвела ошеломляющее впечатление смелостью своих решений, неожиданностью и категоричностью результатов. Но те, кто её не приняли, не приняли и многих из тех выводов, за которые теория относительности ответственна в той же мере, в какой в них виноваты и прежние — классические, более привычные теории. Это полностью относится к понятию об инертной массе энергии. Оно целиком вытекает и из теории относительности. В первый раз в самом общем виде соотношение

$$m = \frac{\varepsilon}{c^2}$$

написано было именно в теории относительности.

Необходимо упомянуть, что в дальнейшей стадии своего развития — в так называемой общей теории относительности — А. Эйн-

штейн показывает, что энергия—в частности и лучистая — должна быть снабжена и другими механическими атрибутами — например весомостью, так что луч, проходя мимо большой массы (около Солнца, например), должен ею притягиваться и соответственно искривляться. Возникая около тяготеющего центра, луч должен «краснеть» — длина испускаемой волны должна сдвигаться к большим волнам и т. п.

Короче, всемирное тяготение должно действовать между порциями энергии так же, как оно действует между порциями вещества. Этому правилу подчиняются все виды энергии, в том числе и кинетическая. Наш соотечественник В. А. Фок провёл вычисления дальше, чем другие, и показал, что, если рассматривать по общей теории относительности действие, скажем, солнечной системы на очень удалённую от неё точку, то оно будет таково же, как если бы действовала вся масса Солнца и всех планет плюс кинетическая энергия всех тел солнечной системы, разделённая на квадрат скорости света²¹.

С этой точки зрения можно утверждать, что теория относительности навела дальнейший порядок в наших представлениях об энергии, привела к установлению дальнейших сходных черт между массой и энергией: последняя приобрела свойства массы не только инертной, но и массы тяготеющей.

Но есть в системе теории относительности и глубоко разрушительные элементы, проявляющиеся, может быть, ярче всего именно в интересующем нас вопросе о родстве между массой и энергией. Теория относительности окончательно довершила разрушение понятия об эфире, начатое уже до неё физиками, занимавшимися вопросами об явлениях на движущихся телах. Они уже ранее показали, что для объяснения всех этих явлений наделить эфир непротиворечивыми свойствами невозможно: для объяснения одних явлений эфир должен оставаться в движущемся теле неподвижным, для объяснения других он должен увлекаться движущимся телом. Теория относительности, отрицая систему абсолютных координат в пространстве, вообще выбрасывает за борт физического познания представление о физической мировой среде, заполняющей геометрическое пространство вселенной.

Это создаёт нам большие трудности в истолковании понятий поля: что такое напряжение поля, энергия поля, силы поля, масса в поле, если материального субстрата этого поля, — субстрата, несущего все его физические свойства, не существует?

Тогда слова Ленина о том, что «движение без материи невозможно» выступают во всей строгости: что мы можем им противопоставить, если нет эфира, нет напряжений в эфире и т. д.?—Только одно: пока мы знаем слишком мало о физическом строении поля и должны ждать того времени, когда дальнейшие исследования разьяснят этот вопрос.

С другой стороны, теория относительности больше, чем все её предшественницы, приучила нас к мысли об эквивалентности между массой и энергией. Укажем такой пример: Астон, открывший изотопы устойчивых атомов, обратил внимание на отступления в атомном весе более сложных атомов от целочисленных отношений: в средней части менделеевской таблицы атомные веса несколько (немного!) меньше, чем суммарный вес входящих в состав атома нейтронов и протонов. Куда же «пропала» масса при постройке атома? — Никто не усумнился признать, что атом есть сильно экзотермическое соединение и при своём образовании выделил огромное количество теплоты. Она-то и обусловила потерю массы.

Если бы, например, мы научились в земных условиях синтезировать водород в гелий, то мы получили бы также громадные количества тепла в виде эквивалента потерянной массы, так как 4 протона имеют массу 4,030, а гелий—4,000; это значит, что на 4 грамма водорода выделится шесть миллионов больших калорий! Да и весь вопрос об «атомной» энергии, со всеми его политическими, военными и космическими возможностями связан с одним уравнением:

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

10. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ

Скоро (в 1950 г.) мы будем отмечать полувековой юбилей квантовой теории. Её создатель, только что скончавшийся немецкий учёный М. Планк, только немного не дожил до юбилея своего фундаментального открытия. Напомним, что при своём теоретическом исследовании над зависимостью «чёрного» излучения от длины волны и температуры Планк²² сделал временно допущение, что энергия разделена на мельчайшие, далее, однако, уже неделимые порции — «кванты», как он их назвал. Он хотел потом отделаться от этого предположения, приняв размер кванта бесконечно малым. Но этого сделать не удалось: при уменьшении величины кванта формула, полученная Планком, вырождалась в другую, давно опровергнутую опытом формулу Релея-Джинса. Начальная же формула Планка изумительно совпадает с результатами всех опытов.

Так неожиданно родилось представление о квантах, и энергия, наряду с весомым веществом и электричеством, обнаружила дискретность, или атомистический характер — новое сходство между энергией и веществом. О дальнейших успехах этого представления мы говорить не будем. Отметим некоторые отличия «атомов энергии» от атомов весомого вещества.

Для удовлетворения ранее найденным свойствам излучения Планку пришлось предположить, что кванты, соответствующие разным лучам, различны, а именно, энергия, заключённая в одном кванте,

пропорциональна числу колебаний, характеризующему излучение:

$$\varepsilon = h\nu,$$

где h — чрезвычайно малая «постоянная Планка». С этой точки зрения кванты инфракрасного света ($\lambda = 500 \mu$) должны быть чрезвычайно малы, а кванты жёстких X-лучей ($\lambda = 0,01 \text{ \AA}$) сравнительно огромны, и интервал этого многообразия занял бы приблизительно 50 октав — разнообразие куда больше разнообразия атомов (от 1 до 240).

Но в то время как величина атомов изменяется от одного к другому всегда на целое число единиц, величина одного кванта может отличаться — и действительно отличается — на любую, сколь угодно малую величину, так как мы можем предположить ν изменяющимся на любую величину. Это — весьма фундаментальное различие. Атом нельзя разбить иначе, как отняв у него целое число нейтронов или протонов. Кванты мы научились самыми разными способами изменять на любую малую величину.

Кванты вообще представляют другой разряд частиц, что видно из следующих соображений: простые рассуждения приводят нас к такому соотношению: если масса частицы, находящейся в покое, равна m_0 , то её масса при скорости v даётся формулой:

$$m^2(c^2 - v^2) = m_0^2 c^2.$$

Если $c \neq v$, то

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

Это — известная закономерность, по которой масса частицы изменяется с величиной скорости. Таковы атомы, нейтроны, протоны, электроны и позитроны. Но если $v=c$, мы ничего не можем сказать относительно m , но зато относительно m_0 вполне убедительно следует, что она равна нулю, т. е. только такие частицы могут двигаться со скоростью света, у которых начальная, так называемая нулевая масса равна нулю. Таковы кванты или фотоны.

Таким образом все частицы в природе распадаются на два вида: одни — с начальной массой, другие — без начальной массы.

Могут ли одни частицы переходить в другие? — Допускается, что электрон и позитрон, сталкиваясь друг с другом, перестают существовать, образуя в то же время два громадных по величине кванта. Это явление окрестили совершенно неподходящим именем «аннигиляции», т. е. уничтожения материи. Конечно, никакого уничтожения здесь не происходит, а происходит только переход частиц с начальной массой в частицы без начальной массы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы подходим к концу нашего обзора. Мы собрали весь необходимый материал и можем заняться его общим осмысливанием.

Энергия предстаёт нам, как некоторая субстанция, во всём подобная весоному веществу и наделённая всеми теми свойствами, которые заставляют нас считать весоное вещество субстанцией: она неразрушима и несоздаваема; она локализована в пространстве; она движется и передаётся; она обладает инертной массой; она весома; она разделена на атомы. Устанавливается точный закон эквивалентности между энергией и веществом. Можно утверждать, что то и другое в одинаковой мере суть то, что мы называем материей.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ю л и у с Р о б е р т М а й е р, Замечания о силах неживой природы (1842); Его же: „Органическое движение в его связи с обменом веществ (1845)“. В издании „Классики естествознания“ ГТТИ, М.—Л., 1933.
2. Joule's Scientific Papers, т. I. О тепловых действиях магнито-электричества и о механическом значении теплоты (1843), а также целый ряд последующих работ (1844, 1845, 1848, 1850, 1867, 1878).
3. Г. фон Гельмгольц, О сохранении силы „Классики естествознания“, ГИЗ, М., 1922; то же М.—Л., 1934, а также многочисленные речи и доклады того же автора в его „Vorträge u. Reden“.
4. Н. А. У м о в, Теория простых сред и её приложение к выводу основных законов электростатических и электродинамических взаимодействий. Записки Новороссийского университета, 10, стр. 1—60 (1871).
5. П. П. Л а з а р е в, Н. А. У м о в. 1940. (Юбилейное издание к 135-летию юбилею М. О-ва испытателей природы.)
6. J. Clerk Maxwell, A treatise on electricity a. magnetism, часть I, глава V, § 111.
7. М. Ф а р а д е й, Экспериментальные исследования по электричеству, т. 1, серия II, гл. 5 (стр. 520—539).
8. Н. А. У м о в, Уравнения движения энергии в телах (1874).
9. А. И. Б а ч и н с к и й, Очерк жизни и трудов Н. А. Умова. М. 1916.
10. П. П. Л а з а р е в, Н. А. У м о в (1846—1915), М., 1940 (юбил. изд. М. О-ва испытателей природы).
11. Lagrange, Mécanique analytique, II, стр. 5 (цитируем по изданию 1815 г.).
12. Poynting, On the transfer of energy in the electromagnetic field, Phil. Trans., часть II, 343 (1884).
13. Ф а р а д е й. См. выше, 7, стр. 439, § 1077.

14. J. J. Thomson, On the electric and magnetic effects produced by the motion of electrified bodies, Phil. Mag. 1881 или в его книге „Recent researches in electricity and magnetism“ (1893), стр. 16—23.
 15. А. Г. Столетов, Собр. соч., II, стр. 319 и сл.
 16. В. И. Ленин, Материализм и эмпириокритицизм, изд. 1931, стр. 220 и сл.
 17. М. Planck, Phys. Zeits. 1908, стр. 828.
 18. H. A. Lorentz, Versuch einer Theorie etc, стр. 28 (изд. 1906 г.).
 19. М. Абрахам, Theorie d. Elektrizität, стр. 24 (изд. 1920 г.).
 20. А. И. Садовский. Пондеромоторные действия электромагнитных и световых волн на кристаллы. Уч. зап. Юрьевского ун-та, 1899.
 21. В. А. Фок. ЖЭТФ 9, стр. 375 (1939).
 22. М. Planck, Ann. d. Phys. 4, стр. 553 (1901).
-