1952 г. Октябрь *Т. XLVIII, вып. 2*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О МАССЕ И ЭНЕРГИИ В СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКЕ

С. Э. Фриш

1. Физические понятия, как и понятия всякой другой науки, устанавливаются не независимо от господствующих философских систем, несмотря на распространённое среди многих буржуазных учёных мнение, что они в своих научных изысканиях свободны от каких-либо философских тенденций. К этим учёным в полной мере приложимы слова Энгельса: «Естествоиспытатели воображают, что они освобождаются от философии, когда игнорируют или бранят ее... в итоге они все-таки оказываются в подчинении у философии, но, к сожалению, по большей части самой скверной...» *).

Физика XVIII и первой половины XIX веков развивалась в основном материалистично. Однако материализм большинства учёных того времени носил механистический характер. Объяснить физическое явление означало свести его к механической модели — к движению неизменных, обособленных частиц—атомов, либо к механическим изменениям в гипотетических сплошных средах. Этот механистический стихийный материализм, в силу своей ограниченности, не был свободен от метафизики. Делались попытки составить представления о физических свойствах объектов в отрыве от их взаимосвязи с другими объектами. Представления о конкретных формах материи, с которыми имеет дело физика, смешивались с философским представлением о материи.

В конце прошлого столетия среди буржуазных учёных всё чаще и чаще стал наблюдаться отход от материалистических позиций в сторону идеализма. Этот отход был вызван в значительной мере обострением классовой борьбы. Правящие круги капиталистических стран стали пользоваться идеалистическими теориями как средством борьбы против нарождающейся прогрессивной идеологии

*) Ф. Энгельс, Диалектика природы, стр. 164—165, Госполитиздат, 1950.

пролетариата. Второй причиной уклона в сторону идеализма явился происшедший под влиянием новых научных открытий крах старых теорий и необходимость искать новые точки зрения. На это последнее обстоятельство указывал Ленин, писавший: «Уклон в сторону реакционной философии ... болезнь роста, вызванная больше всего *крутой ломкой* старых установившихся понятий» *).

Особенно широким распространением среди буржуазных физиков конца XIX и начала XX столетий стала пользоваться реакционная философия Маха. Это распространение было обусловлено кажущейся «научностью» махизма, завуалированностью его идеалистических тенденций, его большей, чем другие идеалистические философии, «приспособленностью» к физике. Появилась своего рода мода пользоваться терминологией махизма, причём этой моде зачастую следовали учёные, которым по сути махизм оставался чужд. Широкое распространение получила порочная идея о том, что определения, предпосылаемые формулировке основных физических законов, якобы произвольны и независимы от самих законов и что законы приобретают то или иное физическое содержание в зависимости от принятых «определений».

Избежать как указанных, так и других ошибок при трактовке основных положений физики можно, лишь твёрдо придерживаясь теории познания диалектического материализма. Необходимо чётко различать философское, гносеологическое представление о материи от тех конкретных представлений, которые дает физика об определённых частных формах движущейся материи. В этом отношении мы имеем многочисленные исчерпывающие высказывания классиков марксистско-ленинской философии. Энгельс пишет: «Поэтому материю и движение *можно* познать лишь путем изучения отдельных веществ и отдельных форм движения; и поскольку мы познаем последние, постольку мы познаем также и материю и движение *как таковые*» **). И дальше: «Материя как таковая, это — чистое создание мысли и абстракция. Мы отвлекаемся от качественных различий вещей, когда объединяем их, как телесно существующие, под понятием материи. Материя как таковая, в отличие от определенных, существующих материй, не является, таким образом, чем-то чувственно существующим. Когда естествознание ставит себе целью отыскать единообразную материю как таковую и свести качественные различия к чисто количественным различиям, образуемым сочетаниями тождественных мельчайших частиц, то оно поступает таким же образом, как если бы оно вместо вишен, груш, яблок желало видеть плод как таковой...» ***).

---

*) В. И. Ленин, Материализм и эмпириокритизм, стр. 287, Госполитиздат, 1949.

**) Ф. Энгельс, Диалектика природы, стр. 187, Госполитиздат, 1950.

***) Там же, стр. 203.

Ту же идею высказывает Ленин, говоря: «Но совершенно непозволительно смешивать, как это делают махисты, учение о том или ином строении материи с гносеологической категорией, — смешивать вопрос о новых свойствах новых видов материи (например, электронов) с старым вопросом теории познания, вопросом об источниках нашего знания, о существовании объективной истины и т. п.» *).

В связи со сказанным не лишне кратко остановиться на поднятом в последнее время в нашей советской литературе вопросе о том, вводятся ли классиками марксизма-ленинизма два понятия о материи — философское и физическое **). Из приведённых высказываний Ленина и Энгельса совершенно очевидно, что не может итти речи о различных понятиях материи, поскольку физика, как и всякая другая наука, изучает частные, конкретные формы материи и её движения, понимаемых в их философском смысле. Следовательно, понятия о материи, вырабатываемые физикой (как и всякой другой наукой), нельзя противопоставлять философскому понятию материи, как нельзя более частное понятие противопоставлять более общему, охватывающему это частное понятие.

Диалектический материализм утверждает, что материя не является чем-то неизменным, но находится в состоянии непрерывного изменения, развития — движения, понимаемого в общем, философском смысле этого слова. «*Движение есть форма бытия материи*. Нигде и никогда не бывало и не может быть материи без движения» (Энгельс ***)). Движущуюся материю можно познавать, лишь рассматривая частные, конкретные формы материи и её движения, причём эти частные формы материи и её движения следует рассматривать не изолированно, но в их взаимосвязи. Это последнее, чрезвычайно важное обстоятельство выражено в замечательнейших словах товарища Сталина: «...ни одно явление в природе не может быть понято, если взять его в изолированном виде, вне связи с окружающими явлениями, ибо любое явление в любой области природы может быть превращено в бессмыслицу, если его рассматривать вне связи с окружающими условиями, в отрыве от них, и, наоборот, любое явление может быть понято и обосновано, если оно рассматривается в его неразрывной связи с окружающими явлениями, в его обусловленности от окружающих его явлений» ****).

Наконец, для правильного понимания места и роли физических открытий в общей системе наших знаний, необходимо всегда

---

*) В. И. Ленин, Материализм и эмпириокритицизм, стр. 112, Госполитиздат, 1949.

**) См., например: М. В. Познер, Наука и жизнь, № 1, 1949; С. Г. Суворов, УФН, т. XLIV, вып. 4, 1952.

***) Ф. Энгельс, Анти-Дюринг, стр. 56—57, Госполитиздат, 1950.

****) И. В. Сталин, О диалектическом и историческом материализме, стр. 5, Госполитиздат, 1950.

помнить, что научные представления лишь приближённо и относительно верно, в соответствии с уровнем развития науки и практики на данном историческом этапе, отображают объективную реальность. Абсолютная истина складывается из сумм относительных истин. Так как мир бесконечно разнообразен и неисчерпаем, то возможно не достижение, а лишь непрерывное приближение к абсолютной истине. Ленин учит нас: «...диалектический материализм настаивает на временном, относительном, приблизительном характере всех этих *вех* познания природы прогрессирующей наукой человека»*).

---

2. Физика составляет представления о частных, конкретных формах движущейся материи на основании наблюдений, опытов и обобщающих их теорий. Понятие о какой-либо физической величине, характеризующей те или иные объективные свойства рассматриваемой конкретной формы движущейся материи, может быть установлено лишь через совокупность закономерных взаимосвязей этой величины с другими физическими величинами.

Исходя из этого положения, необходимо рассмотреть весьма важный вопрос о роли и месте «определений» в физике. Несомненно, обойтись без определений нельзя, и попытка сразу учесть большое число взаимосвязей повела бы к невозможности выделить главное и правильно разобраться в изучаемом явлении. Но «определение» использует одну или немногие взаимосвязи и благодаря этому оно носит своего рода предварительный характер. Соответствует ли введённое с помощью такого «определения» понятие объективно существующим соотношениям обнаруживается лишь после того, как будет рассмотрена достаточно широкая совокупность взаимосвязей и тех законов, которым они подчиняются.

Поясним сказанное на простом примере, взятом из механики. Как известно, в механике элементарная работа ΔA определяется как физическая величина, численно равная произведению из перемещения Δs точки приложения силы и из проекции силы f_s на направление этого перемещения:

$$\Delta A = f_s \Delta s. \tag{1}$$

Однако такое «определение» имеет смысл лишь благодаря существованию связи между работой и изменением энергии системы, к которой приложены силы, совершающие работу. Наука поль-

---

*) В. И. Ленин, Материализм и эмпириокритицизм, стр. 245, Госполитиздат, 1949.

зуется понятием о работе, определяемым равенством (1), не потому, что мы захотели или нашли «удобным» ввести такое понятие, а потому, что оно отражает свойства большого числа реальных процессов, которые одновременно характеризуются рядом других физических величин. Поэтому работа не есть «произведение силы на путь», а является «самостоятельной» физической величиной.

После сказанного становится совершенно ясным, что «определение» никогда не может рассматриваться в отрыве от тех основных законов, которым подчиняется рассматриваемая физическая величина и которые устанавливают её взаимосвязь с другими физическими величинами.

В процессе развития физики возникает необходимость уточнять и расширять существующие «определения» или даже заменять их новыми. Однако такая замена одного определения другим не означает возможности произвола, но ведёт (отбрасывая случаи, когда новое определение является ошибочным) к тому, что новое определение полней и лучше отражает действительность, что оно является шагом вперёд в нашем процессе познания природы. Необходимость в новых определениях в физике возникает обычно тогда, когда под влиянием вновь открытых фактов обнаруживается недостаточность или непригодность старых определений. При этом выявляется степень приближения старого понятия и его пригодность для описания реальных черт лишь ограниченной группы фактов. Отсюда ещё раз подтверждается, что и старое определение не было случайным или произвольным, но отражало действительность с той степенью приближения, которая была неизбежна при ранее существовавшем уровне наших знаний об окружающей нас природе.

---

3. Исходя из указанных в предыдущем разделе общих положений, проанализируем развитие в физике таких двух основных понятий, как понятия о массе и об энергии.

Понятие о массе, как известно, введено в физику Ньютоном в его «Математических началах натуральной философии» (1686 г.). При этом, хотя Ньютон и установил основные законы, которые связывают массу с другими физическими величинами, всё же само определение понятия массы носило у него метафизический характер. Ньютон считал, что масса есть мера количества материи в теле. Это определение удержалось в большинстве учебников почти до наших дней. Так О. Д. Хвольсон в первом томе своего «Курса физики» (изд. IV, 1914) давал следующее определение массы: «масса тела измеряется количеством содержащейся в ней материи». Это определение подвергалось неоднократно критике, в том числе и со

стороны Маха, который не без основания спрашивал: почему вы знаете, что в одном атоме натрия материи больше, чем в одном атоме водорода? Однако, дав эту справедливую критику метафизического ньютоновского определения массы, Мах спешит сформулировать определение массы в духе своей субъективной идеалистической философии: он утверждает, что масса есть лишь коэффициент, встречающийся в определённых уравнениях движения. В том же духе мы встречаем определения и в некоторых современных учебниках физики.

Например, А. Ф. Иоффе*) пишет: «мы можем определить массу как производную количества движения по скорости, а изменение количества движения заменить равным импульсом силы». С. Э. Хайкин в первом издании своей «Механики» **) полагал, что «в зависимости от того, как мы выберем способ измерения массы, характер утверждений, содержащихся во 2-м и 3-м законах Ньютона, оказывается различным».

Более правильное введение понятия о массе дано в «Курсе общей физики» Н. И. Добронравова и соавторов ***) и в «Молекулярной физике» Е. А. Штрауфа ****), где масса рассматривается как физическая величина особого рода, содержание которой выявляется на основании 2-го закона Ньютона.

Исходя из общего положения, сформулированного нами в начале раздела 2, надо считать, что содержание понятия массы выявляется лишь при рассмотрении достаточно широкого ряда фактов и законов, которые нельзя рассматривать оторванно друг от друга.

Впервые классическая механика приходит к представлению о массе, рассматривая явления инертности. При этом, говоря об инертности тел, полагают, что тела различаются неким объективным свойством, проявляющимся в том, что они приобретают не одинаковые ускорения при одинаковых внешних воздействиях. Это свойство, присущее всем телам, может быть охарактеризовано определённой физической величиной, которая и является массой.

Однако для того, чтобы дать количественную характеристику массы, необходимо иметь возможность устанавливать каким-либо независимым от указанного факта способом равенство внешних воздействий на разные тела — воздействий, ведущих к появлению у них ускорения. Это можно сделать различными способами: например, воздействие одного тела на другое можно передавать

*) А. Ф. Иоффе, Курс физики, т. I, изд. 3-е, Гостехиздат, М.–Л., 1940.

**) С. Э. Хайкин, Механика, Гостехиздат, М.—Л., 1940.

***) Н. И. Добронравов и др., Курс общей физики, т. I, изд. 3-е, Гостехиздат, 1941.

****) Е. А. Штрауф, Молекулярная физика, Гостехиздат, 1949.

через посредство какого-либо определённого третьего тела, способного испытывать упругую деформацию (пружина, растянутый шнур и т. д.), и полагать, что воздействия одинаковы, если одинаковы деформации этого третьего тела. Можно исходить из 3-го закона Ньютона, формулируемого следующим образом: воздействия двух тел друг на друга всегда одинаковы по своей величине и направлены так, что вызываемые ими ускорения направлены в противоположные стороны. Опыты показывают, что оба эти способа приводят к одинаковому результату. Воспользовавшись одним из этих способов установления равенства воздействий, мы можем определить массу как величину, обратно пропорциональную тем ускорениям, которые тела приобретают под влиянием одинакового воздействия. Если два тела под влиянием одинакового внешнего воздействия приобретают разные ускорения w_1 и w_2, то отношение их масс m_1 и m_2 удовлетворяет равенству:

$$\frac{m_1}{m_2} = \left|\frac{w_2}{w_1}\right|. \qquad (2)$$

Соотношение (2) позволяет количественно сравнивать массы различных тел; измеряемая таким образом масса может быть названа «инерционной массой», поскольку она измеряется на основании явлений, обозначаемых как явления инерции тел.

Соотношение (2), взятое изолированно, даёт лишь ограниченное представление о физической величине — массе. Для более полного вскрытия содержания понятия массы необходимо его рассматривать совместно с другими фактами. Лишь достаточно широкая совокупность закономерно связанных друг с другом фактов убеждает нас в том, что физическая величина — масса, численное значение которой может быть найдено с помощью соотношения (2), характеризует одно из фундаментальных свойств вещества, а как впоследствии выяснится, — и других видов материи. Укажем наиболее основные из таких фактов: а) масса изолированной системы остаётся постоянной при всех происходящих в ней изменениях; б) количество движения изолированной системы, представляющее собой векторную сумму произведений $m_i\mathbf{v}_i$, тоже остаётся постоянным (здесь m_i — массы тел, образующих систему, а $\mathbf{v}_i$ — векторы их скоростей).

Теперь обратимся к другой группе явлений — к явлениям тяготения (или гравитационным), которые также приводят к представлению о массе.

Как известно, Ньютон же установил так называемый закон всемирного тяготения, по которому любые два тела, размеры которых малы по сравнению с расстоянием между ними, тяготеют друг к другу с силой f, прямо-пропорциональной произведе-

нию их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:

$$f \sim \frac{m \cdot m'}{r^2}. \qquad (3)$$

Если соотношение (3) рассматривать изолированно от соотношения (2), то оно определяет новую физическую характеристику тел — «гравитационную массу», определяющую способность тел создавать поле тяготения и испытывать действие поля тяготения. В каком отношении находится «гравитационная масса» к уже ранее введённой нами «инерционной массе», могут выяснить лишь наблюдения. Сам Ньютон отождествлял обе массы, исходя из факта одинаковости для всех тел ускорения, приобретаемого ими у поверхности Земли под влиянием силы притяжения, а также из выполнимости третьего закона Кеплера. Для того чтобы установить, с какой степенью точности все тела испытывают одинаковое ускорение вблизи поверхности Земли, Ньютон ставил специальные опыты с качающимися маятниками. Эти опыты были впоследствии повторены с большой степенью точности, а также поставлены другие опыты (опыт Этвеша), которые могли бы обнаружить различие в «гравитационной» и «инерционной» массах, если бы таковое имелось. Оказалось, что обе массы не только всегда строго пропорциональны друг другу, но и всегда существуют совместно, т. е. нет тела, обладающего лишь «инерционной массой» и не обладающего «гравитационной массой», и наоборот. Таким образом, опыты показывают полную невозможность различить «гравитационную» и «инерционную» массы. Следовательно, как в инерционных, так и гравитационных явлениях дело идёт лишь о различных проявлениях одной и той же физической величины — массы.

Вводя понятие о массе, мы начали с инерционных явлений и воспользовались соотношением (2) для измерения масс. Можно было бы поступить иначе и начать с гравитационных явлений, установив с помощью соотношения (3) способ измерения масс, аналогичный тому, каким электрические заряды измеряются на основании закона Кулона, формально сходного с законом тяготения. Такой способ рассуждений не внёс бы никаких принципиальных изменений, так как полное представление о массе составляется лишь на основании всей совокупности фактов, включающих в себя явления и гравитационные и инерционные.

Вместе с тем, если численное значение массы определять обоими способами — инерционным и гравитационным, то окажется, что оба эти способа не одинаково «чувствительны». Эта различная «чувствительность» обусловлена тем фактом, что силы тяготения практически заметны лишь тогда, когда, по крайней мере, одна из двух тяготеющих масс велика, силы же, которые необходимо при-

ложить для сообщения небольшой массе относительно небольшого ускорения, вполне измеримы. Например, практически невозможно обнаружить силу тяготения между двумя телами, масса каждого из которых равна 1 *г*. Сила же, которую необходимо приложить к телу с массой в 1 *г*, чтобы сообщить ему даже относительно небольшое ускорение, легко измерима.

Это обстоятельство находит отражение в соотношении между численными значениями массы, полученными один раз на основании 2-го закона Ньютона, а второй раз на основании закона тяготения при одних и тех же единицах измерения силы, длины и времени. Предположим, что один раз мы определяем численное значение массы при заданных единицах измерения силы, длины и времени с помощью 2-го закона Ньютона:

$$f = m_и w, \tag{4}$$

где индекс «и» у массы m означает, что численное значение этой массы определяется через инерционное явление. В принятой нами системе измерения, где за основные единицы выбраны единицы силы, длины и времени, размерность массы окажется равной:

$$[m_и] = FL^{-1}T^2,$$

где символ F означает размерность силы.

Пусть, затем, численное значение той же самой массы определяется с помощью закона тяготения при тех же единицах измерения силы, длины и времени. Тогда:

$$f = \frac{m_г \cdot m_г'}{r^2}, \tag{5}$$

где индекс «г» у массы m означает, что её численное значение определяется через гравитационное явление. Размерность массы при таком способе измерения равна:

$$[m_г] = F^{1/2}L.$$

В первой системе измерения закон тяготения примет вид

$$f = k\frac{m_и \cdot m_и'}{r^2}, \tag{6}$$

где k представляет собой постоянную («гравитационную постоянную»), имеющую в нашей системе размерность $F^{-1}L^4T^{-4}$ и численное значение $k = 6{,}685 \cdot 10^{-8}$, при измерении сил, длин и времени, соответственно в динах, сантиметрах и секундах. Из сравнения

равенств (5) и (6) вытекает:

$$m_г = \sqrt{k} \cdot m_и. \tag{7}$$

Наличие в формуле (6) малого численного множителя $k \cong 6{,}7 \cdot 10^{-8}$ означает указанную меньшую «чувствительность» гравитационных явлений по отношению к проявлению массы, чем явлений инерционных. Мы остановились подробно на этом обстоятельстве, так как оно нам понадобится в дальнейшем.

Тождественность «гравитационной» и «инерционной» масс полностью выясняется в теории тяготения Эйнштейна. В уравнениях этой теории фигурирует одна физическая величина, проявляющаяся и в качестве «массы инерционной» и в качестве «массы гравитационной». Гравитационная постоянная k выражается через коэффициенты g_{ik}, определяющие метрику пространства, которая в свою очередь определяется наличными массами и их пространственным распределением.

Резюмируя, мы можем сказать: совокупность большого числа разнообразных фактов приводит нас к представлению о физической величине, массе, характеризующей весьма общие свойства вещества (а как будет показано дальше — и других видов материи), проявляющиеся как в инерционных явлениях, так и в явлениях тяготения.

---

4. Содержание понятия энергии, как и понятия массы, может быть вскрыто лишь на основании рассмотрения большой совокупности связанных между собой фактов. Эти факты относятся к области превращения одних форм движения материи в другие и указывают на существование такой физической величины, которая остаётся при всех этих превращениях постоянной. Попытки найти физическую величину, сохраняющуюся при взаимодействиях тел, первоначально относились лишь к явлениям механическим. Известен происходивший в конце XVII столетия спор между Лейбницем и картезианцами об «истинной мере сил», причём первый полагал такой мерой произведение mv^2, а вторые — произведение mv. В значительно более общем и глубоком смысле поставил вопрос о «всеобщем законе сохранения» М. В. Ломоносов, писавший в 1748 г.: «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 положит кто на бдение, столько же сну отнимет. Сей всеобщий естественный закон простирается и в самые правила движения: ибо тело, движущее своею силою другое, столько же оных у себя теряет, сколько сообщает другому, которое от него движение получает»

Дальнейшее существенное развитие закон сохранения энергии получил лишь через сто лет после Ломоносова в середине XIX века в работах Майера и Гельмгольца. Однако мы не будем останавливаться на этих работах, так как рассуждения Майера носили слишком общий характер, Гельмгольц же, наоборот, ограничивался рассмотрением явлений только механических. Мы сразу перейдём к высказываниям Энгельса, впервые полностью выявившим принципиальное, философское содержание закона превращения и сохранения энергии. Энгельс писал: «Но когда мы подводим эти многообразные формы явлений под одно общее название движения, то дело тут отнюдь не в том только, что наш рассудок объединяет их вместе. Напротив, эти формы сами доказывают своим действием, что они являются формами одного и того же движения, ибо при известных обстоятельствах они переходят друг в друга... И происходит это таким образом, что определенному количеству движения одной формы всегда соответствует точно определенное количество движения другой формы, причем опять-таки безразлично, из какой формы движения заимствована единица меры, которой измеряется это количество движения...» *).

Как видно из приведённой цитаты, Энгельс подчеркнул существенность взаимного превращения одних видов движения **) в другие. Следовательно, дело должно прежде всего итти о нахождении такой физической величины, которая являлась бы общей мерой для всех рассматриваемых в физике конкретных видов движения материи при их взаимных превращениях. Возможность найти такую общую «меру движения» вытекает из огромного числа физических опытов, показавших, что удаётся установить эквивалентные отношения между любыми видами воздействия на систему.

Благодаря взаимной превращаемости всех видов движения друг в друга, одно и то же изменение системы может произойти в результате различных внешних воздействий. Например, данное тело можно нагреть на определённое число градусов $T_2 - T_1$ при заданных условиях (например, при постоянном давлении) путём весьма различных внешних воздействий: механических, электрических, световых и т. д. Это обстоятельство и позволяет устанавливать эквивалентное соотношение между различными воздействиями. Поскольку в числе этих воздействий всегда может быть и механическое, измерения позволяют установить, какому количеству механической работы, определяемой равенством (1): $\Delta A = f_s \cdot \Delta s$, эквивалентно данное воздействие. Существенно отметить, что установленная таким образом эквивалентность механическим воздейст-

*) Ф. Энгельс, Диалектика природы, стр. 52, Госполитиздат, 1950.

**) Понятие движения здесь, как и повсюду далее, употребляется в его общем философском смысле.

виям вместе с тем устанавливает и эквивалентность любых видов воздействий между собой. Для иллюстрации этого обстоятельства уместно вспомнить один весьма остроумный опыт Джоуля, который заключался в следующем: в небольшом сосуде с водой помещался замкнутый металлический провод. Сосуд располагался между полюсами электромагнита и вращался как целое, вместе с содержащимися в нём водой и проводом. Тогда в проводе индуцировался электрический ток, который нагревал воду. Измерения показали, что каждой единице механической работы, затраченной на вращения сосуда, соответствовало такое же нагревание воды, как если бы оно было вызвано непосредственно в результате работы против сил трения.

Указанная возможность оценивать любые внешние физические воздействия, ведущие к изменению формы движения материи, в эквивалентных количествах механической работы нашла своё выражение в словах Энгельса: «Мера движения — работа» *) и «работа — это изменение формы движения, рассматриваемое с его количественной стороны» **).

Располагая способом количественно сравнивать любые внешние воздействия, можно поставить задачу о характеристике самой системы с помощью такой физической величины E, изменение которой при переходе системы из одного состояния в другое определялось бы внешними воздействиями, выраженными в эквивалентных им количествах механической работы. Обозначая через E_I и E_{II} значения физической величины E, соответствующие двум состояниям системы I и II, получим:

$$E_{II} - E_I = \sum \Delta A; \tag{8}$$

где $\sum \Delta A$ — сумма механических эквивалентов всех внешних воздействий, под влиянием которых система перешла из состояния I в состояние II. Очевидно, такую величину E можно ввести в рассмотрение только в том случае, если она окажется однозначной функцией состояния системы. Так это или не так, может показать лишь опыт.

Огромное число опытов показывает, что при любом круговом процессе сумма механических эквивалентов всех внешних воздействий равна нулю. Тогда из соотношения (8) вытекает, что E действительно является однозначной функцией состояния системы, так как в результате протекания кругового процесса (состояние II совпадает с состоянием I) полу-

*) Ф. Энгельс, Диалектика природы, стр. 60, Госполитиздат, 1950.

**) Там же, стр. 70.

чится, что $E_{II} = E_I$. Физическая величина E и представляет собой энергию системы.

Понятие об энергии, вытекающее из соотношения (8), было точно выяснено лишь в 1887 году Планком *).

Подразумевая под изолированной системой такую, на которую не оказывается никаких внешних воздействий, мы получим, что для изолированной системы $\sum \Delta A = 0$, и следовательно, по (8) $E_{II} = E_I$. Отсюда вытекает, что энергия изолированной системы постоянна, какие бы процессы в ней ни происходили. Это положение представляет собой закон сохранения энергии.

Резюмируя, мы можем сказать, что огромное число связанных между собой фактов указывает на возможность объективно характеризовать рассматриваемые в физике конкретные виды движущейся материи с помощью физической величины — энергии, представляющей собой однозначную функцию состояния системы, изменение которой определяется суммой механических эквивалентов всех внешних воздействий на систему. Энергия изолированной системы остаётся постоянной при любых изменениях, происходящих в такой системе.

Последнее обстоятельство указывает, что энергия как раз является той общей характеристикой различных конкретных форм движущейся материи, которая остаётся неизменной при их взаимных превращениях.

Содержание понятия энергии полностью вскрывается лишь через всю совокупность указанных фактов и законов. Всякая попытка «определить» энергию какой-либо краткой фразой будет неминуемо сводиться к использованию ограниченной группы фактов, которые смогут лишь частично выявить свойства энергии.

Понятие об энергии, как и о всякой другой основной физической величине, подвергалось многочисленным идеалистическим и механистическим извращениям. Различные идеалистические извращения сказывались в том, что энергия рассматривалась либо как нечто внешнее по отношению к материи, либо энергия отождествлялась с материей («энергетизм» Оствальда). Последняя точка зрения одновременно была и метафизической, так как она заменяла все конкретные виды движущейся материи одним — «энергией». Как всякая метафизическая точка зрения, и эта оказалась бесплодной и не соответствующей действительности.

---

*) М. Планк, Принцип сохранения энергии. Русский перевод, ГОНТИ, 1938.

Мах пытался всячески преуменьшить значение закона сохранения энергии, утверждая, что этот закон не может претендовать на большее значение, чем любой другой частный закон физики, например закон Бойля-Мариотта. Со стороны последователей Маха неоднократно высказывалась мысль, что соотношение (8) можно всегда формально удовлетворить, придумывая, наряду с известными, новые виды энергии и что поэтому оно не имеет особого физического смысла. Порочность этой точки зрения легко доказать, хотя, действительно, по мере обнаружения новых физических явлений приходится вводить в рассмотрение и новые виды энергии. Дело заключается в том, что возможность ввести в рассмотрение новый вид энергии всегда зиждется на опытном факте, указывающем, что при круговом процессе, в котором участвует и вновь открытый вид превращений, сумма механических эквивалентов всех внешних воздействий попрежнему остаётся равной нулю. Таким образом, дело идёт о расширении старого понятия об энергии в соответствии с вновь открытыми объективными явлениями природы.

Формулировка закона сохранения энергии по мере развития наших знаний может меняться. Но факт закономерной взаимопревращаемости различных форм движения материи остаётся незыблемым. Это имел в виду Энгельс, когда он писал: «любая форма движения оказалась способной и вынужденной превращаться в любую другую форму движения. Дойдя до этой формы, закон достиг своего последнего выражения. Посредством новых открытий мы можем доставить ему новые подтверждения, дать ему новое, более богатое содержание. Но к самому закону, как он здесь выражен, мы не можем прибавить больше ничего. В своей всеобщности, в которой и форма и содержание одинаково всеобщи, он не способен ни к какому дальнейшему расширению: он есть *абсолютный закон природы*»*).

Метафизические и механистические точки зрения на энергию сказались в попытках представить энергию как особого рода «субстанцию» или, говоря более грубо, как особого рода «жидкость», содержащуюся в телах и перетекающую от одних тел к другим. Понятие об энергии утвердилось в физике во второй половине XIX столетия, когда механистические попытки объяснять различные физические явления с помощью гипотетических «жидкостей» (теплород, электрическая жидкость и т. д.) в основном уже были оставлены. Тем не менее в учении об энергии установилась терминология, связанная с этими механистическими тенденциями; до сих пор мы говорим об энергии, «содержащейся» в теле, о «потоке» энергии и т. д. Хотя сама по себе указанная

*) Ф. Энгельс, Диалектика природы, стр. 178—179, Госполитиздат, 1950.

терминология и может быть сохранена, но всякие попытки воскресить на её основе механистические представления об энергии являются порочными. Такая попытка была сделана в недавнее время в нашей советской литературе Т. П. Кравцом*), который, исходя из представлений о «потоке» энергии и из факта конечности скорости распространения любых физических воздействий, пытался приписать энергии «субстанциональность».

Представить энергию в виде особой «субстанции», т. е. особого вида материи, нельзя, так как энергия является характеристикой состояния конкретных видов движущейся материи и полностью определяется через параметры, относящиеся к данному виду материи.

---

5. Рассмотрим теперь вопрос о связи между энергией и массой. Открытие такой связи относится к числу важнейших достижений физики XX века. Общий вывод о существовании определённой связи между энергией и массой системы был получен из теории относительности Эйнштейном в 1905 г. В настоящее время, в результате непосредственных измерений, производимых при ядерных превращениях, можно считать эмпирически установленным, что изменение энергии системы на величину ΔE ведёт к изменению её массы на величину:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}, \tag{9}$$

где c — скорость света в пустоте, равная $\sim 3 \cdot 10^{10}$ *см/сек*. Энергия и масса взаимно связаны в том смысле, что увеличение энергии системы приводит к одновременному увеличению её массы, уменьшение энергии — к уменьшению массы. При этом дело идёт о всех проявлениях массы, т. е. при изменении энергии меняются и инерционные и гравитационные свойства системы.

Соотношение (9) повело к необходимости пересмотреть многие положения классической физики, в том числе и условия, при которых выполняются законы сохранения массы и энергии. Рассмотрим оба эти закона подробнее.

Закон сохранения масс утверждает, что масса изолированной системы остаётся постоянной при любых изменениях, происходящих внутри системы. Аналогично, закон сохранения энергии утверждает, что энергия изолированной системы постоянна при всех изменениях системы. Поставим вопрос: какая система называется «изолированной», одинаковы ли крите-

---

*) Т. П. Кравец, УФН, т. XXXVI, стр. 338, 1948.

рии изолированности в обоих случаях? Обращаясь к истории науки, легко видеть, что критерии изолированности при установлении обоих законов были разными. М. В. Ломоносов, экспериментально доказавший существование закона сохранения массы, помещал различные вещества в запаянный стеклянный сосуд и взвешивал его до и после того, как вещества химически прореагировали. Реакция вызывалась нагреванием сосуда. Оба взвешивания давали один и тот же результат. Так же поступали Лавуазье и все другие исследователи, которые после Ломоносова проверяли выполнимость закона сохранения массы при химических реакциях. Из способа постановки этих опытов видно, что критерием изолированности системы служило отсутствие обмена веществом (в твёрдом, жидком или газообразном состояниях) между системой и окружающими телами. Внешние же воздействия (нагревание и т. д.) могли оказываться на систему. Будем такой критерий изолированности называть критерием частичной изолированности.

Указанная частичная изолированность, очевидно, недостаточна для постоянства энергии. Для того чтобы энергия системы оставалась неизменной, должен отсутствовать не только обмен веществом между системой и окружающими телами, но должны отсутствовать и всякие внешние воздействия на систему. Следовательно, для выполнения закона сохранения энергии выдвигался другой, более строгий критерий изолированности, чем для выполнения закона сохранения массы. Такой более строгий критерий изолированности мы будем называть критерием полной изолированности *).

Соотношение (9) между энергией и массой показывает, что при соблюдении частичной изолированности системы в действительности масса не может оставаться постоянной. Возможные, при соблюдении этого критерия, изменения энергии системы поведут к изменению её массы. Например, нагревание какого-либо вещества, запаянного в стеклянном сосуде, поведёт к увеличению его энергии, а следовательно, по соотношению (9), и к возрастанию его массы. То обстоятельство, что такое изменение массы экспериментально не было обнаружено ни Ломоносовым, ни всеми последующими учёными, объясняется тем, что необходим весьма большой обмен энергией между системой и окружающими телами, чтобы изменение массы системы стало заметным. Это обстоятельство находит своё выражение в наличии малого множителя $\frac{1}{c^2} = 1{,}1 \cdot 10^{-21}$ *сек*^{2}/*см*^{2} в выражении (9). Оба способа

*) В действительности полная изолированность никогда не может быть в точности осуществлена. Однако это не имеет принципиального значения для дальнейших рассуждений, так как мы можем сколь угодно приближаться к условиям полной изолированности.

обнаружения изменения системы путём определения внешних воздействий по их механическим эквивалентам и путём определения массы не одинаково «чувствительны», аналогично тому, как гравитационные методы и методы, основанные на явлениях инерции, не одинаково «чувствительны» для определения массы тела. Тем не менее в точности масса системы остаётся постоянной лишь при полной изолированности системы. Таким образом мы приходим к выводу: для полностью изолированной системы выполняются оба закона сохранения: 1) её масса остаётся неизменной, 2) её энергия остаётся неизменной.

В физической литературе неоднократно встречаются утверждения, что из факта взаимосвязи между массой и энергией якобы вытекает несоблюдение законов сохранения массы и энергии, взятых в отдельности, и что будто только сумма массы и энергии изолированной системы остаётся постоянной. Также часто говорят, что «масса превращается в энергию» и т. д. Как видно из сказанного, такие утверждения совершенно ошибочны: в полностью изолированной системе каждая из физических величин — масса и энергия остаются постоянными, следовательно, «перехода» одной из этих величин в другую не происходит*).

Физика XIX века допускала существование таких видов материи, которые не обладают массой. Например, допускалось, что излучение (свет) не проявляет ни инерционных, ни гравитационных свойств, и, следовательно, считалось, что к нему неприменимо понятие о массе. Однако уже существование светового давления, впервые экспериментально установленного П. Н. Лебедевым, заставило приписать световому потоку определённое количество движения и тем самым указало на наличие у излучения инерционных свойств. Наличие же взаимосвязи между энергией и массой, выражаемой соотношением (9), приводит к выводу, что любой конкретный вид материи, рассматриваемый в физике, обладает массой. Действительно, энергетическая характеристика применима к любому виду материи, рассматриваемому в физике, так как все формы движения материи взаимопревращаемы. Но раз любой конкретный вид материи обладает энергией, то по соотношению (9) он обладает и массой.

Из существования взаимосвязи между энергией и массой вытекает ещё одно важное следствие. Пока считалось, что для сохранения массы системы необходимо лишь отсутствие обмена веществом с окружающими телами, получалось, что масса системы

---

*) По поводу ошибочности представлений о «превращении массы в энергию» и обратно см. также статью Н. Ф. Овчинникова «Масса и энергия». Природа, № 11, 1951.

не зависит от её состояния. В силу же соотношения (9) масса оказывается зависящей от состояния системы, так как с изменением состояния системы меняется её энергия и, следовательно, происходит соответственное изменение массы.

Непосредственные измерения показывают, например, что сумма масс некоторого количества протонов и нейтронов, расположенных на достаточно больших расстояниях друг от друга, отлична от массы системы того же числа протонов и нейтронов, образующих атомное ядро. При образовании атомного ядра выделяется большое количество энергии ΔE, которая передаётся окружающим телам, в результате чего масса ядра становится на величину $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$ меньше, чем сумма масс протонов и нейтронов, входящих в состав ядра.

Впервые зависимость массы от состояния системы была обнаружена на примере зависимости массы от скорости движения (экспериментально это было установлено для быстрых электронов). Для буржуазных учёных, державшихся метафизического определения массы как величины, характеризующей «количество» материи, этот факт казался опровержением материалистической философии.

Полная несостоятельность такого вывода, как известно, была вскрыта Лениным, который указал: « „Материя исчезает“ — это значит исчезает тот предел, до которого мы знали материю до сих пор, наше знание идет глубже; исчезают такие свойства материи, которые казались раньше абсолютными, неизменными, первоначальными (непроницаемость, инерция, масса и т. п.) и которые теперь обнаруживаются, как относительные, присущие только некоторым состояниям материи. Ибо *единственное* „свойство“ материи, с признанием которого связан философский материализм, есть свойство *быть объективной реальностью*, существовать вне нашего сознания»*).

---

6. В силу взаимосвязи между энергией и массой, выражаемой соотношением (9), изменение состояния системы под влиянием внешних воздействий может характеризоваться изменением любой из этих двух величин. В этом отношении энергия и масса «эквивалентны» друг другу.

Однако обе эти величины, как мы указывали, не одинаково «чувствительны» для характеристики изменения состояния систе-

*) В. И. Ленин, Материализм и эмпириокритицизм, стр. 243, Госполитиздат, 1949.

мы. Изменение системы, вызванное, например, её нагреванием (в пределах обычного изменения температур), легко обнаружить по изменению её энергии, но практически невозможно обнаружить по изменению её массы.

Указанные различия в энергии и массе не означают ещё невозможности объединить их в более общем физическом понятии. Как мы видели, «инерционная» и «гравитационная» массы, несмотря на их также различную «чувствительность» для характеристики какого-либо одного свойства системы, могут быть объединены в одном понятии массы. Поэтому естественно возникает вопрос, не вытекает ли из факта взаимосвязи между энергией и массой возможность объединить их в одном более общем физическом понятии. Теория относительности даёт на этот вопрос положительный ответ. В этой теории вводится так называемый «тензор масс»*) T^{ik} $(i, k = 0, 1, 2, 3)$, который является функцией состояния системы. Инвариант T^{ik} имеет размерность плотности масс, тот же инвариант, умноженный на c^2, — размерность плотности энергии. Для полностью изолированной системы выражение

$$\frac{\partial T^{00}}{\partial x^0} + \sum_{k=1}^{3} \frac{\partial T^{0k}}{\partial x^k} = 0$$

даёт законы сохранения массы и энергии, а выражения

$$\frac{\partial T^{i0}}{\partial x^0} + \sum_{k=1}^{3} \frac{\partial T^{ik}}{\partial x^k} = 0$$

$$(i = 1, 2, 3)$$

— закон сохранения количества движения. Таким образом, одна весьма общая физическая величина («тензор масс») одновременно характеризует всю ту совокупность явлений, которые в классической физике раздельно характеризовались такими физическими величинами, как масса и энергия.

С указанной точки зрения объединение понятий энергии и массы происходит аналогично тому, как было произведено объединение понятий «инерционной» и «гравитационной» масс в едином понятии массы.

Однако необходимо разобрать, является ли такая аналогия достаточно полной и нет ли обстоятельств, указываю-

*) Термин «тензор масс» предложен В. А. Фоком. В работах буржуазных физиков этот тензор обычно называется «тензором материи», что ведёт к путанице между понятиями о конкретных видах материи, с которыми имеет дело физика, и общим философским понятием о материи.

щих на отсутствие полной «эквивалентности» между энергией и массой.

Мы указали, что любое изменение энергии ΔE ведёт к одновременному изменению массы системы на величину $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$. Но вопрос о том, существует ли возможность достигнуть любого изменения массы системы за счёт внешних воздействий (например, совершения работы внешними силами) пока остаётся неразъяснённым. Если ответ на этот вопрос отрицателен, то энергия и масса не вполне «эквивалентны» друг другу.

Чтобы ответить на поставленный вопрос, разберём с точки зрения современной физики свойства некоторых конкретных систем. В качестве первого примера выберем систему, состоящую из N атомов, каждый из которых обладает массой покоя m_{0i} (под массой покоя m_{0i} подразумевается то значение массы, которое имеет находящийся в нормальном состоянии изолированный атом по отношению к системе отсчёта, в которой он покоится). Допустим, что в нашей системе не происходит ядерных превращений, так что число атомов N постоянно. Масса такой системы равна:

$$M = \sum_N m_{0i} + \sum_N \frac{E_{ki}}{c^2} + \sum_N \frac{E_{pi}}{c^2} + \sum_N \frac{E_{\text{возб } i}}{c^2} + \frac{E_{\text{изл}}}{c^2}, \qquad (10)$$

где E_{ki} и $E_{\text{возб } i}$ — кинетическая энергия атома и энергия возбуждения его электронной оболочки, E_{pi} — потенциальная энергия, включающая в себя и ту часть потенциальной энергии, которая вызвана взаимодействием между атомами, образующими рассматриваемую систему; $E_{\text{изл}}$ — энергия излучения, содержащегося в пределах системы.

Энергия той же системы равна:

$$E = c^2 \sum_N m_{0i} + \sum_N E_{ki} + \sum_N E_{pi} + \sum_N E_{\text{возб } i} + E_{\text{изл}}. \qquad (11)$$

Если система полностью изолирована, то при происходящих в ней процессах меняется лишь относительное значение отдельных видов энергии, масса же M системы, определяемая равенством (10), и её полная энергия E, определяемая равенством (11), остаются постоянными. Таким образом, в соответствии со сказанным выше, при условии полной изолированности сохраняется в отдельности каждая из величин — масса M и энергия E.

В обычных земных условиях имеет место неравенство:

$$\sum_N m_{0i} \gg \sum_N \frac{E_{ki}}{c^2} + \sum_N \frac{E_{pi}}{c^2} + \sum_N \frac{E_{\text{возб}\,i}}{c^2} + \frac{E_{\text{изл}}}{c^2} \tag{12}$$

и тогда с достаточной степенью приближения масса системы равна:

$$M = \sum_N m_{0i}, \tag{10a}$$

в то время как энергия попрежнему даётся формулой (11). Это соотношение выражает ранее отмеченный нами факт, что в обычных земных условиях практические законы сохранения массы и энергии выполняются «раздельно», т. е. при разных условиях изолированности системы. Для постоянства массы системы M в соответствии с формулой (10a) практически достаточно, чтобы сохранялось неизменным число атомов N, образующих систему.

Однако, если и учесть относительно небольшие изменения массы M, которые могут иметь место при условии частичной изолированности системы, то всё же остаётся в силе положение, что большая часть массы рассматриваемой системы, а именно, та часть, которая обусловлена массой покоя атомов *), не может быть исчерпана за счёт только внешних воздействий (работы).

Это обстоятельство заставило В. А. Фока **) разделить массу на «пассивную» и «активную» части, из которых вторая «более легко» может изменяться под влиянием внешних воздействий ***).

Включим теперь в круг наших рассмотрений ядерные превращения, однако без процессов превращения электронов и позитронов в фотоны и обратно. Тогда вместо атомов следует рассматривать «элементарные» частицы, т. е. протоны, нейтроны, электроны и т. д. с их массами покоя m_{0i}. При этом в выражениях (10) и

---

*) Под массой покоя атома мы здесь подразумеваем массу атома относительно системы отсчёта, в которой он покоится, причём мы рассматриваем изолированный, невозбуждённый атом. Если эти последние требования не выполнены, то масса покоя в определённой своей части тоже зависит от состояния системы, т. е. может меняться под влиянием внешних воздействий.

**) В. А. Фок, Масса и энергия. Публикуется в настоящем выпуске.

***) Сумма масс покоя в выражении (10) не всегда велика по сравнению с остальными членами. Например, в очень больших туманностях член $\frac{E_{\text{изл}}}{c^2}$ может быть одного порядка с суммой масс частиц, входящих в состав туманности. Большая часть массы такой туманности относится к «активной» форме.

(11) следует выделить энергию связи частиц в ядрах $E_{\text{связи } i}$. Тогда вместо (10) получим:

$$M = \sum_N m_{0i} + \sum_N \frac{E_{\text{связи } i}}{c^2} + \sum_N \frac{E_{ki}}{c^2} + \sum_N \frac{E_{pi}}{c^2} + \sum_N \frac{E_{\text{возб } i}}{c^2} + \frac{E_{\text{изл}}}{c^2}, \qquad (13)$$

где теперь N означает число элементарных частиц. При ядерных превращениях меняется число атомов, входящих в состав системы, при этом изменения энергии связи $E_{\text{связи}}$, как известно, могут быть весьма велики. Тем не менее при полной изолированности системы *) и при наличии в ней ядерных превращений её масса M остаётся неизменной. Сильно меняются, в соответствии с изменением $E_{\text{связи}}$, и другие виды энергии. Если, например, ядерные реакции идут с убылью $E_{\text{связи}}$, то в выражении (10) сильно возрастают E_{ki}, $E_{\text{возб } i}$ и $E_{\text{изл}}$, т. е. система сильно нагревается и в ней значительно возрастает плотность излучения.

Если же будет выполнено лишь условие частичной изолированности, которое теперь мы понимаем в том смысле, что не может происходить обмена частицами, обладающими конечной массой покоя m_{0i}, между системой и окружающими телами, то при наличии ядерных превращений масса системы M может заметно измениться. Однако и в этом случае относительное изменение массы мало. Действительно, средняя энергия связи в ядрах, рассчитанная на один нуклеон (т. е. протон или нейтрон), равняется приблизительно 8 *Мэв*, в то время как энергия $c^2 m_{0i}$, соответствующая массе покоя одного нуклеона, составляет около 900 *Мэв*. Следовательно, и при ядерных превращениях масса частично изолированной системы меняется незначительно — на величину, не превышающую 1% от общей массы системы. Таким образом, масса указанных, систем распадается на две части — одну, не зависящую от состояния системы, и другую, зависящую от состояния, причём первая из них значительно больше второй (за исключением случаев, когда велик член $E_{\text{изл}}/c^2$; см. сноску на стр. 187). Только вторая из них

*) Следует иметь в виду, что для системы, в которой происходят радиоактивные превращения, мы не в состоянии в настоящее время реализовать с достаточной степенью приближения условия полной изолированности. Это обусловлено тем, что неизвестны способы задерживать нейтрино. Известен лишь процесс возникновения нейтрино за счёт других форм материи (например, при β-превращениях ядер), «обратный» же процесс — переход нейтрино в другие формы материи пока не обнаружен. Поиски такого процесса, очевидно, представляют собой одну из актуальных задач современной ядерной физики.

является «активной» формой, она может меняться за счёт внешних воздействий и, следовательно, только за её счёт можно получить работу.

До сих пор мы исключали из рассмотрения процесс превращения пар электрон-позитрон в фотоны и обратный ему процесс возникновения пар электрон-позитрон за счёт фотонов. Так как фотоны не обладают массой покоя, то при наличии таких процессов в системе меняется число частиц, обладающих отличной от нуля массой покоя. В результате масса такой системы при условии частичной изолированности может, вообще говоря, меняться, как угодно. Например, если система первоначально состояла только из позитронов и электронов, то в результате превращения пар её масса может целиком перейти в «активную» форму и может быть полностью исчерпана за счёт совершения работы против внешних сил.

Резюмируя, мы приходим к выводу, что только в системах, в которых возможно полное превращение форм материи, обладающих массой покоя, в формы материи, не обладающие массой покоя, масса и энергия вполне «эквивалентны» друг другу в том смысле, что не только всякое изменение энергии ведёт к изменению массы, но что и масса системы может быть целиком исчерпана за счёт внешних воздействий (совершения работы). Системы, в которых не происходит превращения материи из форм, обладающих массой покоя, в формы, не обладающие массой покоя, масса и энергия не вполне «эквивалентны» друг другу в указанном выше смысле этого слова.

Если процессы превращения форм материи, обладающих массой покоя, в формы, не обладающие массой покоя, возможны во всех случаях (хотя бы через любое число промежуточных превращений), то основания для раздельного рассмотрения массы и энергии вообще теряют смысл.

Однако нам представляется, что в настоящее время ещё нельзя окончательно притти к такому выводу. Дело в том, что превращение частиц с конечной массой покоя в частицы с нулевой массой покоя, повидимому, связано с наличием «симметричных» частиц, т. е. частиц, имеющих равные и противоположные по знаку заряды *). Именно такой парой частиц являются электрон и позитрон. По отношению же к протону нам неизвестна симметричная частица («отрицательный протон») и поэтому вопрос, может ли происходить превращение протонов в частицы с нулевой массой покоя, остаётся открытым. Так же обстоит дело и с вопросом о превращении нейтронов в частицы с нулевой массой покоя. Если такого превращения не существует, то

*) Мы исключаем из рассмотрения, как мало изученные, процессы превращения мезонов, например π-мезона в μ-мезон.

значительная часть массы обычных систем, а именно масса покоя протонов и нейтронов, должна быть отнесена к «пассивной» части массы, обобщать которую в едином понятии с энергией нельзя.

Таким образом, по нашему мнению, современный уровень знаний ещё не позволяет окончательно решить вопрос, можно ли полностью обобщить понятия массы и энергии в едином более общем понятии, аналогично тому, как это можно сделать по отношению к понятиям о массах «инертной» и «гравитационной». Как во всех вопросах физики, так и в этом случае лишь опыт может дать окончательное решение и позволить расширить наши представления об окружающем нас материальном мире в соответствии с его реальными свойствами.