

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**МАССА И ЭНЕРГИЯ****В. А. Фок**

Согласно принятому в механике словоупотреблению масса тела есть мера его инертности (инертная масса). С другой стороны, слово «масса» употребляется в смысле способности тела создавать поле тяготения и испытывать силу в этом поле (тяготеющая или весомая масса). Инертность и способность создавать поле тяготения представляют совершенно различные проявления свойств материи. То, что меры этих различных проявлений обозначаются одним словом, однако, не случайно, а обусловлено тем, что оба свойства всегда существуют совместно и всегда друг другу пропорциональны, так что, при надлежащем выборе единиц, меру того и другого свойства можно выражать одним и тем же числом. Равенство массы инертной и массы тяготеющей есть факт экспериментальный, подтверждённый с огромной степенью точности (опыты Этвеша). Самые же определения этих понятий (основанные на соответствующих проявлениях свойств материи) — различны. Существует физическая теория, а именно, теория тяготения Эйнштейна, в которой фундаментальный закон равенства массы инертной и массы тяготеющей учитывается автоматически, в том смысле, что одна и та же постоянная, входящая при решении уравнений, фигурирует и в качестве массы инертной и в качестве массы тяготеющей.

Как следует отвечать на вопрос: есть ли масса инертная и масса тяготеющая одно и то же или нет? По своим проявлениям они различны, но численные характеристики их друг другу пропорциональны. Такое положение вещей принято характеризовать словом «эквивалентность».

Аналогичный вопрос возникает в связи с понятиями массы и энергии (для определённости мы будем говорить об инертной массе). Определение массы мы только что напомнили. Энергия обычно определяется как мера способности производить работу. Для определения энергии существенным является, во-первых, закон сохранения энергии и, во-вторых, способность различных видов энергии к взаимному превращению. То и другое вместе называют

законом сохранения и превращения энергии. Существование этого всеобщего закона позволяет сводить измерение энергии любого вида к измерению энергии частного вида, например механической, и выражать энергию любого вида в одних и тех же (например, механических) единицах. Таким образом, проявления свойств материи, соответствующих массе и энергии, бесспорно различны. Однако теория относительности утверждает, что масса и энергия неразрывно друг с другом связаны и притом пропорциональны друг другу. Всякое изменение энергии системы сопровождается изменением её инертной массы. Это относится не только к изменениям кинетической энергии тела, при которых масса покоя остаётся неизменной, но и к изменениям различных видов внутренней энергии, при которых масса покоя меняется.

В физике известны явления, когда вся энергия, соответствующая массе покоя тела, может превратиться в энергию излучения (которое, конечно, обладает той же массой). Обратно, энергия массы покоя может возникнуть за счёт энергии излучения. Мы имеем в виду явление превращения пары электрон — позитрон в гамма-квант и обратное явление порождения гамма-квантом такой пары.

Всякой энергии W следует приписать массу $M = W/c^2$ и всякой массе M можно сопоставить энергию $W = Mc^2$. Обе эти величины всегда друг другу пропорциональны, и, выражая их в одних и тех же (скажем, энергетических) единицах, их можно измерять одним и тем же числом.

Рассматриваемый в теории относительности тензор энергии поля или сплошной среды отличается лишь множителем c^2 от тензора массы, и закон сохранения энергии в этой теории есть в то же самое время закон сохранения массы.

Таким образом, на поставленный выше вопрос, представляют ли масса и энергия одно и то же или нет, мы можем дать тот же ответ, как и в отношении массы инертной и массы тяготеющей. Проявления свойств материи, соответствующих массе и энергии, различны, но численные характеристики этих свойств пропорциональны друг другу. В этом случае также можно говорить об эквивалентности — об эквивалентности массы и энергии.

Мы только что сказали, что в теории относительности закон сохранения энергии есть в то же самое время закон сохранения массы. Но здесь возникает такой вопрос. Ведь опыт показывает нам, что в громадном большинстве известных физических процессов в отдельности сохраняется масса тела (определяемая по взвешиванию) и в отдельности сохраняется его энергия (определяемая по выделяющемуся теплу или по производимой работе). Таким образом, фактически наблюдаются **два** закона сохранения. Как это согласовать с тем, что в теории относительности формулируется только **один** закон?

На этот вопрос можно дать следующий ответ. Строгий закон сохранения — один: для полной массы тела M и для соответствующей ей полной энергии тела W . Но подавляющая часть энергии (и соответствующей ей массы покоя) в превращениях обычно не участвует и сохраняется в отдельности. Тем самым сохраняется и оставшаяся, активная, часть энергии, участвующая в превращениях.

Разделение энергии на «пассивную» часть, в превращениях (в данном процессе) не участвующую, и на «активную» часть, способную переходить в другие виды, можно проследить на примере релятивистских уравнений движения сплошной упругой среды. Наиболее наглядно это разделение проявляется в приближённых формулах для составляющих T^{00} и T^{0i} ($i = 1, 2, 3$) релятивистского тензора массы. Напомним, что величина T^{00} есть полная плотность массы, а умноженные на скорость света c три величины T^{0i} представляют поток массы.

Упомянутые приближённые формулы могут быть написаны в виде

$$T^{00} = \rho + \frac{1}{c^2} S; \quad cT^{0i} = \rho v_i + \frac{1}{c^2} S_i. \quad (1)$$

Здесь ρ и ρv_i есть плотность и поток той части массы, которая в превращениях не участвует ($\mathbf{v}$ есть скорость среды). Эти величины в отдельности удовлетворяют закону сохранения

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0. \quad (2)$$

Скаляр S и вектор S_i представляют введённые Умовым (1874 г.) плотность и поток энергии (скаляр и вектор Умова). Для упругого тела эти величины имеют вид

$$S = \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho \Phi, \quad (3)$$

$$S_i = v_i \left(\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho \Phi \right) - \sum_{k=1}^3 p_{ik} v_k, \quad (4)$$

где p_{ik} есть трёхмерный тензор натяжений, а Φ — потенциальная энергия единицы массы. Величины S и S_i удовлетворяют установленному Умовым закону сохранения *)

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial S_i}{\partial x_i} = 0. \quad (5)$$

*) См. Н. А. У м о в, Избранные сочинения, Гостехиздат, 1950. Приведённые Умовым на стр. 175 явные выражения для S_i отличаются от (4) отсутствием членов с потенциальной энергией Φ и удовлетворяют (вместе с плотностью кинетической энергии) закону сохранения в форме, несколько отличающейся от (5) [в правой части (5) должна стоять работа сил упругости в единице объёма за единицу времени].

Таким образом, уравнение

$$\frac{1}{c} \frac{\partial T^{00}}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial T^{0i}}{\partial x_i} = 0, \quad (6)$$

выражающее закон сохранения полной массы (и соответствующей ей полной энергии), удовлетворяется в силу (2) и (5).

Как видно из (1), полная плотность массы T^{00} составлена из плотности ρ «пассивной» части массы и плотности S/c^2 «активной» её части.

Мы говорили выше о том, что определяемая из взвешивания полная масса тела (куда включена и переменная её часть) практически сохраняется, несмотря на то, что тело выделяет или поглощает энергию. Это объясняется просто недостаточной точностью взвешивания, в соединении с тем, что подавляющую часть массы обычных тел составляет пассивная её часть.

Изменения же активной части массы могут быть прослежены с гораздо большей точностью, путём измерения соответствующей части энергии (т. е. при помощи калориметрических методов, а не путём взвешивания).

Естественно задать вопрос о более глубокой причине того, что при обычных условиях подавляющая часть энергии связана настолько прочно, что находится в совершенно пассивном состоянии. Почему даже ничтожная её часть не выходит из этого состояния и не нарушает баланса активной части энергии? На этот вопрос теория относительности сама по себе не может дать ответа. Ответа следует искать, по нашему мнению, в области квантовых закономерностей, одной из характерных особенностей которых является существование устойчивых состояний с дискретными уровнями энергии. Для элементарных частиц энергия, соответствующая массе покоя, может либо превратиться в активную форму энергии (например, в излучение) целиком, либо она вовсе не превращается. Малая утечка массы невозможна. Это проверено на опыте в случае электрона и позитрона, но этого следует ожидать и для других элементарных частиц. Поскольку подавляющая часть массы атомов находится в форме массы элементарных частиц, невозможность малой утечки массы должна иметь место и для атомов. Кроме того, нужно иметь в виду дискретность энергетических уровней.

Таким образом, по нашему мнению, причина особой прочности связи пассивной части энергии — квантового характера.

Следует подчеркнуть относительный характер разделения энергии (с соответствующей массой) на пассивную и активную части. В обычных химических реакциях не только внутриядерная энергия, но и энергия внутренних электронных оболочек атомов ведёт себя пассивно. При весьма высоких температурах, когда становится возможной полная или почти полная ионизация атомов,

энергия внутренних электронных оболочек приобретает активный характер. Наконец, в процессах, связанных с перестройкой атомных ядер, активной становится и внутриядерная энергия. Однако и тогда энергия, соответствующая массе покоя тяжёлых элементарных частиц, входящих в состав ядер, продолжает оставаться в пассивном состоянии.

Особо прочная связанность подавляющей части энергии (с её массой) и позволяет говорить о законе сохранения масс и о законе сохранения энергии как о двух отдельных законах, хотя в теории относительности эти два закона сливаются в один.

Оба эти закона связаны с именем Ломоносова. Закон сохранения масс при химических реакциях был открыт и экспериментально доказан Ломоносовым и затем подтверждён Лавуазье. Что же касается закона сохранения энергии, то хотя Ломоносов и не дал точной его формулировки (она была дана лишь в XIX веке Р. Майером), но был убеждён в его существовании и весьма близко подошёл к современной его форме в своём знаменитом письме Эйлеру в 1748 г.
