

### § 34. Масса и энергия

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, подтвержденный 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 определенности 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, к 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 ее инертной массы. Это относится не только к изменениям кинетической энергии тела, при которых масса покоя остается 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 (которая, конечно, обладает той же массой). Обратню, энергия массы покоя может возникнуть за счет энергии излучения. Мы имеем в виду явления превращения пары электрон—позитрон в гамма-квант и обратное явление порождения гамма-квантом такой пары.

Соотношение между массой и энергией мы подробно изучили в предыдущих параграфах. Мы видели, что всякой энергии  $W$  следует приписать массу  $M = \frac{W}{c^2}$  и всякой массе  $M$  следует 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.

Далее, мы видели, что тензор энергии отличается лишь множителем  $c^2$  от тензора массы и закон сохранения энергии 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 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. Но лучше называть рассматриваемый фундаментальный закон просто законом пропорциональности массы и энергии.

Мы только что сказали, что 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 производимой работе). Таким образом, 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  $W = Mc^2$ . Но подавляющая часть энергии (и соответствующей ей массы покоя) в превращениях обычно не участвует и сохраняется в отдельности. Тем самым сохраняется и оставшая, 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 уравнений гидродинамики, разобранных нами в § 32. Выделив (путем перехода к сопутствующей системе отсчета) кинетическую энергию, мы рассматривали там две плотности массы покоя: полную плотность  $\rho^*$  и плотность пассивной части  $\rho$ . Эти две величины были связаны,

согласно (32.25), соотношением

$$\rho^* = \rho + \frac{1}{c^2} \rho^* \Pi, \quad (34.01)$$

где второй член представляет деленную на  $c^2$  плотность потенциальной энергии сжатия.

Еще более наглядно это разделение видно из приближенных формул (32.32) и (32.34) для полной плотности массы  $T^{00}$  и полного потока массы  $cT^{0i}$ . Согласно (32.33), эти формулы могут быть написаны в виде

$$T^{00} = \rho + \frac{1}{c^2} S; \quad cT^{0i} = \rho v_i + \frac{1}{c^2} S_i. \quad (34.02)$$

Здесь  $\rho$  и  $\rho v_i$  — плотность и поток той части массы, которая в превращениях не участвует, а скаляр и вектор Умова  $S$  и  $S_i$  представляют плотность и поток активной части энергии (деленные на  $c^2$ , эти величины дают плотность и поток активной части массы).

Мы говорили выше о том, что определяемая из взвешивания полная масса тела (куда включена и переменная ее 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 ее часть. С другой стороны, изменение активной части массы может быть прослежено с гораздо большей точностью, путем измерений соответствующей части энергии (т. е. при помощи калориметрических методов, а не путем 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 ее 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 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 превращаться в активную форму энергии (в излучение) либо 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, 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 ведет 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 тяжелых элементарных частиц, входящих в состав ядер, продолжает оставаться в пассивном состоянии.

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

Закон сохранения массы при химических реакциях был открыт и экспериментально доказан Ломоносовым и затем подтвержден Лавуазье. Что же касается закона сохранения энергии, то точная формулировка его была дана лишь в XIX в. Р. Майером. Однако еще в XVII в. Х. Гюйгенс, а затем в XVIII в. Бернулли применяли его в области механики, а всеобщий характер закона ясно сознавался Ломоносовым, как это видно из его знаменитого письма Эйлеру 1748 г.

---