1952 г. Октябрь *Т. XLVIII, вып. 2*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

О СВЯЗИ МЕЖДУ МАССОЙ И ЭНЕРГИЕЙ

Э. В. Шпольский

1. За последнее время вопрос о связи между массой и энергией приобрёл большую остроту. Хотя основное соотношение

$$E = mc^2$$

получило исчерпывающее экспериментальное подтверждение и приобрело выдающуюся по своему значению научную и практическую важность, в его истолковании и даже в формулировке неоднократно делались и делаются до сих пор грубые ошибки. Вот почему обсуждение вопросов, относящихся к связи масса — энергия, отыскание правильных формулировок для выражения фактов и теоретических положений, принадлежащих к кругу этих вопросов, в высшей степени актуально и целесообразно. Для выполнения этой задачи нам представляется полезным напомнить элементарные выводы соотношения $E = mc^2$ и последовательно рассмотреть примеры его применения к возможно простым процессам. Этому и посвящена настоящая статья.

---

2. Прежде чем переходить к обсуждению интересующей нас темы по существу, необходимо отчётливо фиксировать, чтó мы разумеем под массой и энергией? В механике общепринято под массой тела разуметь меру его инерции. Этого определения мы и будем придерживаться.

Под энергией мы разумеем, вообще говоря, способность производить работу. Это определение выглядит проще всего, когда речь идёт о механических явлениях. Однако вся сила закона сохранения и превращения энергии состоит именно в том, что он указывает общую меру и количественно точные соотношения между различными видами энергий. В самом деле, благодаря взаимной превращаемости различных видов энергии, одно и то же изменение в системе может быть осуществлено различными путями, с помощью разных видов энергии. Среди этих видов всегда имеется и механическое воздействие. Поскольку, в силу закона сохранения энергии, между различными видами энергии, вызывающими одно и то же изменение, всегда имеется определённое численное соотношение, можно измерение любого вида энергии сводить к измерению механической энергии. Мы выражаем это термином «эквивалентность» и говорим, например, об эквивалентности теплоты и механической работы.

Эта важнейшая философская сторона закона сохранения энергии очень хорошо выражена в следующих словах Энгельса: «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...»*).

Отметим, что наиболее общее количественное определение понятия «энергия», данное Планком, использует именно эту взаимную превращаемость различных видов энергии. Это определение гласит: «Энергия есть сумма механических эквивалентов всех внешних действий, которые производятся системой, когда последняя каким бы то ни было образом переходит из данного состояния в некоторое состояние, принятое за основное (нулевое)» **). Мы не будем здесь останавливаться на развитии и обосновании этого определения. Отметим только, что упоминание основного (нулевого) состояния указывает на то, что, поскольку это состояние может быть выбрано произвольно, в численном выражении энергии всегда имеется произвольная постоянная. Наличие этой произвольной постоянной яснее всего видно на примере механической энергии. Последняя, как известно, представляет собой сумму кинетической и потенциальной энергии; потенциальная же энергия определяется лишь через свою производную, т. е. включает в себя произвольную постоянную.

Открытие закона сохранения и превращения энергии и последовавшее затем быстрое развитие новой науки — термодинамики — явилось одним из важнейших успехов естествознания второй половины XIX столетия. Но это же развитие породило и идеалистическое извращение, каким была «энергетика» Оствальда. Ленин в «Материализме и эмпириокритицизме» подверг уничтожающей критике «энергетику» и показал, что она является источником новых идеалистических попыток мыслить движение без материи и что она представляет собой попытку «...„новой“ терминологией замазать старые гносеологические ошибки» ***).

*) Ф. Энгельс, Диалектика природы, стр. 52, 1950 г.
**) См., например, М. Планк, Термодинамика, ГИЗ, 1925, стр. 47.
***) В. И. Ленин, Сочинения, 4-е изд., т. 14, стр. 258.

3. Вернёмся теперь к вопросу о массе. Ньютоновское определение массы, как количества вещества, неоднократно подвергалось критике с чисто логической точки зрения. Однако непоправимый удар этому определению был нанесён развитием электронной теории, а именно, доказательством существования электромагнитной массы. Чтобы это стало ясным, вспомним, как обосновывается необходимость существования электромагнитной массы. Изменение скорости тела, например от 0 до v, требует затраты некоторой работы. Если это тело несёт электрический заряд, то работа будет больше, так как заряженное движущееся тело окружено не только электростатическим, но и магнитным полем и на создание последнего должна быть затрачена добавочная работа. Обратно, если остановить движущееся заряженное тело, то магнитное поле должно при этом исчезнуть. Но исчезновение магнитного поля по закону индукции вызовет появление добавочного электрического поля и легко видеть, что в точке, где находится центр инерции тела, это электрическое поле будет иметь такое направление, что оно будет *ускорять* тормозящееся заряженное тело. Всё будет происходить так, как если бы наличие *электромагнитного поля* заряженного тела вызывало появление добавочной *инерции*, т. е. — *добавочной массы*.

В высшей степени поучительно то, каким образом *вычисляется* электромагнитная масса, например электромагнитная масса электрона. Предполагая, что электрон есть шарик и задаваясь распределением электрического заряда в этом шарике (например, допуская, что электричество распределено *по поверхности*), вычисляют полную энергию поля движущегося шарика (для случая движения с малыми скоростями). С этой целью сначала вычисляют плотность энергии магнитного поля в некоторой точке пространства, лежащей вне электрона, а затем выполняют интегрирование *по всему пространству*, за исключением части его, лежащей внутри электрона. При этом получается для полной энергии поля

$$\Delta E = \frac{1}{3}\frac{e^2}{r_0 c^2} v^2.$$

Если прибавить эту энергию к кинетической энергии движущегося электрона, то получится

$$E = \frac{1}{2}\left(m + \frac{2}{3}\frac{e^2}{r_0 c^2}\right)v^2.$$

Второй член в скобках и есть электромагнитная масса

$$\Delta m = \frac{2}{3}\frac{e^2}{r_0 c^2}. \qquad (1)$$

Таким образом, с точки зрения классической электронной теории, полная масса должна состоять из двух частей

$$m + \Delta m,$$

причём второе слагаемое

$$\Delta m = \frac{2}{3} \frac{e^2}{r_0 c^2} \tag{2}$$

и есть электромагнитная масса. Мы видим, что эта электромагнитная масса отнюдь не локализована в самом электроне, но обусловлена его полем, простирающимся до бесконечности, т. е. как бы «разлита» во всём пространстве. Это — полевая масса. Вопрос в том, каково соотношение между m и Δm, т. е. между «механической» или, точнее, неэлектромагнитной и электромагнитной массой? Как известно, в начале нынешнего столетия было распространено убеждение, что m вообще равно нулю, т. е. что вся масса электромагнитного происхождения. Это мнение обосновывалось тем, что в случае движения с произвольно большими скоростями выведенный Лоренцом закон изменения электромагнитной массы со скоростью

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

получил экспериментальное подтверждение.

Однако с тех пор, как теория относительности показала, что такая зависимость от скорости должна иметь место для массы любого происхождения, этот аргумент отпал. Более того, в настоящее время можно определённо утверждать, что даже в случае электрона только часть массы — электромагнитного происхождения *).

Общеизвестно, что открытие электронов и установление у них электромагнитной массы в начале XX столетия дало повод идеалистам для атаки на материализм. Мы знаем, однако, что Ленин в «Материализме и эмпириокритицизме» показал, что новые факты физики только подтверждают диалектический материализм.

---

4. Мы показали таким образом, что наличие электрического заряда увеличивает инерцию тела. Покажем теперь более общим образом, что всякому избытку энергии в виде энергии электромагнитного поля ΔE соответствует избыток массы Δm, равный

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

Для доказательства вообразим совершенно однородную трубу AB длины L (рис. 1); её центр инерции расположен точно посредине в точке O. Предположим теперь, что дно цилиндра A имеет избыток энергии ΔE в виде энергии электромагнитного поля, а дно B «за-

*) По поводу современного положения вопроса о полевой массе см. Д. Иваненко и А. Соколов, Классическая теория поля. Гостехиздат, 1951, стр. 180 и след., 221 и след. См. также В. Вейскопф, Современные достижения в теории электрона, УФН 41, 165, 1950.

чернено» так, что оно полностью поглощает падающую на него электромагнитную волну. Пусть в некоторый момент A излучает свой избыток энергии в виде «вспышки», вследствие чего в трубе начинает распространяться слева направо короткий цуг электромагнитных волн S. Примем теперь во внимание экспериментально доказанное Лебедевым световое давление. Благодаря этому давлению в момент излучения труба испытает отдачу, направленную справа налево и равную

$$\frac{\Delta E}{c}.$$

Под влиянием этой отдачи труба придёт в движение и будет перемещаться влево до тех пор, пока цуг волн S не дойдёт до стенки B, где он полностью поглотится. Вследствие этого труба испытает толчок вправо, под влиянием которого она остановится, передвинувшись на расстояние x. Это расстояние легко вычислить.

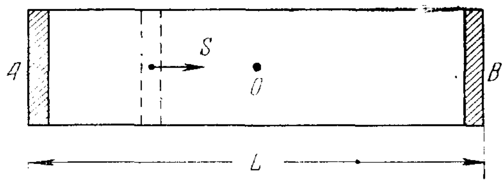

Рис. 1.

Обозначим массу трубы через M, её скорость через v. Тогда имеем прежде всего:

$$Mv = \frac{\Delta E}{c}; \quad v = \frac{\Delta E}{Mc}.$$

Далее, принимая во внимание, что время, в течение которого двигалась труба, равно

$$t = \frac{L}{c},$$

найдём расстояние x

$$x = vt = \frac{\Delta EL}{Mc^2}. \tag{3}$$

Мы пришли таким образом к выводу, что центр инерции переместился на расстояние x. Но это противоречит основным законам механики, именно закону сохранения импульса, в силу которого центр инерции системы не может переместиться под влиянием одних только внутренних сил. Это противоречие можно устранить единственным путём: избытку энергии ΔE нужно сопоставить избыток массы Δm. В таком случае перед вспышкой левый конец трубы будет обладать этим избытком массы Δm и будет поэтому расположен соответственно ближе к центру массы, а после поглощения энергии ΔE в правом конце B и соответственного увеличения его массы на Δm труба должна передвинуться как раз настолько, чтобы центр инерции остался на месте. Принимая во внимание, что масса Δm переместилась на расстояние L, имеем:

$$x = \frac{\Delta m}{M} L,$$

откуда, воспользовавшись (3), находим:

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

что и требовалось доказать.

В этом выводе мы совсем не пользовались теорией относительности. Более того, с точки зрения теории относительности в этом выводе имеются неточности, на которые указал Л. И. Мандельштам. Эйнштейн дал другой вывод, свободный от этих неточностей. Рассмотрим тело, равномерно движущееся со скоростью v и имеющее такую форму, что при излучении отдача будет компенсирована вследствие симметрии. Пусть, например, тело имеет форму пластинки и излучает в обе стороны плоские волны. Согласно теории относительности в той системе координат, относительно которой скорость тела равна v, импульс, уносимый плоскими волнами, равен

$$\Delta p = \frac{\Delta E \cdot v}{c^2}.$$

На такую величину должен уменьшиться импульс излучающего тела. Но так как скорость его не меняется (вследствие того, что отдачи, обусловленные испусканием электромагнитных волн, направлены в противоположные стороны и друг друга компенсируют), то должна измениться масса. Если масса тела до излучения была — M, а после излучения M', то по закону сохранения импульса

$$Mv = M'v + \Delta E \frac{v}{c^2},$$

откуда

$$M' = M - \frac{\Delta E}{c^2},$$

так что

$$\Delta M = \frac{\Delta E}{c^2}.$$

---

5. До сих пор мы обосновывали соотношение между массой и энергией для случая электромагнитного поля. Рассмотрим теперь ряд примеров, которые покажут нам, что это соотношение имеет весьма общий характер и применимо к любому виду энергии. С этой целью мы сначала обсудим простейший процесс — центральный удар двух идеально упругух шаров — и покажем, что применение к этому случаю закона сохранения массы и закона сохранения проекции количества движения сразу приводит к релятивистской формуле для зависимости массы от скорости при

условии, что используется теорема сложения скоростей теории относительности*).

Пусть мы имеем два абсолютно тождественных идеально упругих шара, масса каждого из которых в системе координат S', где они покоятся, равна m_0. Рассмотрим их центральное соударение, предполагая, что шары движутся по оси x' (рис. 2). Пусть скорость первого относительно S' будет $+v'$, второго $-v'$. В момент соударения шары останавливаются, после чего они обмениваются скоростями: первый движется со скоростью $-v'$, второй со скоростью $+v'$. Введём ещё систему координат S, скорость которой относительно S'

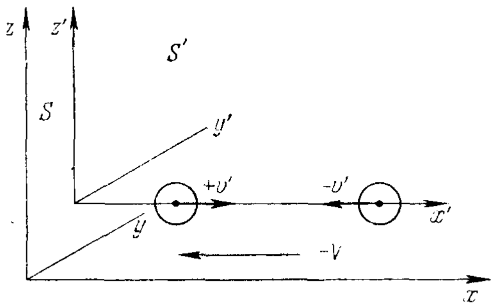

Рис. 2.

пусть равна $-V$. Тогда скорость S' относительно S будет V, а скорости шаров относительно S будут v_1 и v_2. При этом по теореме сложения скоростей классической механики до соударения

$$v_1 = v' + V, \qquad v_2 = -v' + V, \tag{4}$$

а по теореме сложения скоростей теории относительности

$$v_1 = \frac{v' + V}{1 + \frac{v'V}{c^2}}, \qquad v_2 = \frac{-v' + V}{1 - \frac{v'V}{c^2}}. \tag{5}$$

Чтобы различать наши шары, обозначим их массы в системе координат S соответственно через m_1 и m_2. Воспользуемся теперь законами сохранения массы и проекций количества движения, которые должны иметь место в любой системе координат. Обозначив через M сумму масс частиц в момент соударения, т. е. в момент, когда их скорости одинаковы и равны нулю в системе S'

*) Рассуждения, приводимые в этом и в следующем параграфах, принадлежат Г. Н. Льюису и Р. Тольману. См., например, R. Tolman Phil. Mag. 23, 375 (1912).

и равны $+V$ в системе S, напишем:

$$\left.\begin{aligned} m_1 + m_2 &= M, \\ m_1 v_1 + m_2 v_2 &= MV. \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

Эти равенства утверждают, что сумма масс частиц и сумма их x-составляющих количества движения до соударения и в момент соударения друг другу равны. Простое вычисление сразу показывает, что если воспользоваться теоремой сложения скоростей ньютоновой механики и подставить вместо v_1 и v_2 их выражения по (4), то из (6) получается $m_1 = m_2$, т. е., что масса не зависит от скорости. (Напоминаем, что шары по условию тождественны, а потому — в системе координат, где оба они покоятся, их массы одинаковы.) Если, однако, воспользоваться теоремой сложения скоростей релятивистской механики и подставить в (6) вместо v_1 и v_2 их выражения по (5), то после некоторых вычислений *), которые мы опускаем, получится

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\sqrt{1 - \frac{v_2^2}{c^2}}}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}}.$$

Это показывает, что массы обоих шаров, одинаковые, когда шары покоятся, и равные в этом случае, например, m_0, обратно пропорциональны $\sqrt{1 - \frac{v^3}{c^2}}$, если они двигаются со скоростью v. Итак,

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \qquad (7)$$

что мы и хотели показать.

---

6. Нетрудно убедиться в том, что полученная указанным общим способом формула (7) для зависимости массы от скорости уже заключает в себе в неявном виде соотношение между массой и энергией

$$\Delta E = c^2 \Delta m. \qquad (8)$$

В самом деле, мы сейчас покажем, что из формулы (7) может быть получена формула (8) или, наоборот, из формулы (8) получена формула (7) без каких бы то ни было добавочных гипотез или постулатов. Рассмотрим тело с массой m, движущееся со скоростью v (для простоты положим, что тело движется вдоль оси X).

*) См., например, Э. В. Шпольский, Атомная физика, т. I, стр. 515, Гостехиздат, 1951 г.

Основной закон механики в релятивистской формулировке гласит

$$d(mv) = Fdt. \tag{9}$$

Далее, по определению работы

$$dE = Fds = Fvdt. \tag{10}$$

Выполняя дифференцирование в левой части (9), напишем:

$$mdv + vdm = Fdt. \tag{11}$$

Дифференцируя (7), получаем:

$$dm = \frac{m_0 v dv}{c^2 \sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^3}}. \tag{12}$$

Подставим (12) в (11); после простых преобразований найдём:

$$\frac{m_0 dv}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^3}} = Fdt. \tag{13}$$

Наконец, комбинируя (10) и (13), получаем:

$$dE = \frac{m_0 v dv}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^3}}$$

или, принимая во внимание (12),

$$dE = c^2 dm,$$

что и требовалось показать.

Аналогичными рассуждениями, взяв за основу формулу (8) и пользуясь (9) и (10), можно получить формулу (17) для зависимости массы от скорости. Тем самым доказано, что любые рассуждения, основанные на зависимости массы от скорости, в неявном виде основаны на связи массы и энергии.

Подчеркнём, что в рассуждениях этого параграфа речь шла о *кинетической* энергии, поскольку рассматривалось равномерное движение тела. Таким образом показано, что формула (8), ранее выведенная нами для случая энергии электромагнитного поля, имеет место и для *кинетической энергии* движущегося тела. Эта связь между изменением кинетической энергии и изменением массы, становится особенно наглядной при переходе к нерелятивистскому случаю.

Полагая, что $\frac{v}{c} \ll 1$, разложим в (7) множитель $\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$ в степенной ряд и воспользуемся первыми двумя членами разложения. Тогда получим

$$m = m_0 + \frac{1}{c^2}\,\frac{1}{2}\,m_0 v^2 = m_0 + \frac{E_{кин}}{c^2}, \tag{14}$$

как и следовало ожидать.

Может показаться странным, что наличию кинетической энергии соответствует избыток массы $\Delta m = \frac{E_{\text{кин}}}{c^2}$. Следующие соображения, которые мы заимствуем из лекций по теории относительности*) Г. А. Лоренца, показывают, что если масса определяется как мера инерции, то в этой связи нет ничего удивительного.

«Рассмотрим закрытый сосуд, в котором находится газ. Каким образом мы замечаем по законам движения этой системы, что в сосуде находится газ? Представим себе, что сосуд имеет форму прямоугольного параллелепипеда и что мы ему сообщаем постоянное ускорение, — скажем, слева направо. Мы будем считать, что стенки сосуда с внутренней стороны шероховаты и что поэтому после удара о стенку молекулы имеют движение, которое складывается из переносной скорости стенки и из теплового движения. Ради простоты представим себе, что газ настолько разрежен, что мы можем отвлечься от соударений молекул между собой. Если бы система имела постоянную скорость, то ею бы обладали также и молекулы, и удары о правую и о левую стенку были бы одинаково интенсивны, как если бы сосуд покоился. Но если движение — ускоренное, то в момент удара молекула ещё не имеет полной скорости поступательного движения сосуда; она именно имеет скорость поступательного движения, которую сосуд имел раньше, при предшествующем соударении со стенкой. Легко видеть, что вследствие этого удары о левую стенку будут интенсивнее, удары же о правую стенку — менее интенсивны, нежели при равномерном движении. Поэтому получается, что сосуд испытывает со стороны газа результирующую силу, направленную влево — и что поэтому для ускорения потребуется бóльшая сила, нежели в том случае, когда сосуд пустой. Мы это выражаем в утверждении, что масса системы стала больше. Что же касается увеличения массы, которое по закону Эйнштейна обусловлено увеличением внутренней энергии, т. е. усилением молекулярного движения газа, то не подлежит сомнению, что его можно объяснить, если учесть интенсивность ударов молекул о противолежащие стенки. Однако эти соударения надо рассчитывать по законам теории относительности».

Отметим кстати, что это рассуждение совершенно аналогично тому, при посредстве которого, исходя из существования светового давления, была обоснована необходимость приписывания массы излучению. Именно было указано, что если сосуду, наполненному равновесным излучением, сообщить ускорение вправо, то давление

*) H. A. Lorentz, Das Relativitätsprinzip. Drei Vorlesungen gehalten in Teylers Stiftung zu Haarlem. — B. Teubner. Leipzig u. Berlin, 1914, p. 29.

излучения на левую стенку будет больше, чем на правую, из чего следует заключить, что сосуд, наполненный излучением, должен иметь бо́льшую массу.

---

7. Рассмотрим теперь простой пример, который позволит нам сделать ещё один шаг в направлении обобщения полученного результата.

Пусть в некоторой системе координат покоится шар K (рис. 3), составленный из двух в точности одинаковых полушарий K' и K''. В этой системе координат масса шара пусть будет M_0, а следовательно, масса каждого полушария будет $m_0 = \frac{1}{2} M_0$.

Разделим теперь наш шар на составляющие его полушария, раздвинем их на некоторое расстояние, а затем сообщим им одинаковые, но противоположно направленные скорости v. В момент соприкосновения полушарий K' и K'' мы снова получим шар, покоящийся в той же системе координат. Однако мы его обозначим теперь уже не через K, но через K^* по той причине, что, хотя K^* и K в отношении образующего их вещества, совершенно тождественны и хотя они оба покоятся в одной и той же системе координат, — их массы неодинаковы, а именно, масса K^* больше массы K. Действительно, перед соударением массы K' и K'' равны

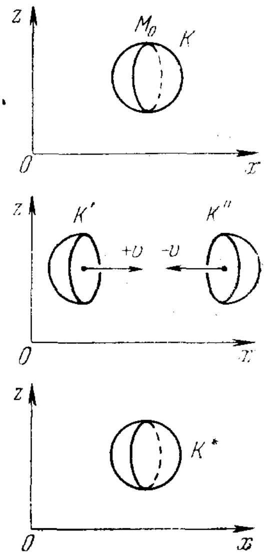

Рис. 3.

$$\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\frac{1}{2} M_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}},$$

а следовательно, сумма их масс, т. е. масса K^*, будет

$$M_0^* = \frac{2 m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{M_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$

Но очевидно, что

$$M_0^* > M_0, \tag{15}$$

а именно,

$$\Delta m = M_0^* - M_0 = M_0\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - 1\right). \tag{16}$$

Этот результат на первый взгляд кажется парадоксальным. Как это может быть, чтобы два тела, вполне тождественные в отношении образующего их вещества, оба покоящиеся в одной и той же системе координат, обладали в этой же системе координат различной массой? Однако никакого парадокса на самом деле здесь нет, так как тела K и K^*, тождественные во всех других отношениях, различаются своим внутренним состоянием. Рассмотрим два предельных случая:

а) Тело K (а значит, и K' и K'') — идеально упругое. В этом случае в шаре K^* возникает упругая деформация, под влиянием которой полушария K' и K'' вновь разлетаются с теми же скоростями v (но, разумеется, противоположно направленными). Итак, K^* отличается от K наличием энергии упругой деформации ΔE, которой и соответствует избыток массы Δm.

б) Тело K — абсолютно неупругое. В этом случае после соударения K' и K'' образовавшийся шар K^* сохраняется, но он нагревается. Шар K^* и в этом случае отличается от K избытком внутренней энергии ΔE, а следовательно, — избытком массы Δm.

Итак, в обоих случаях избыток массы связан с избытком энергии ΔE — либо в виде энергии упругой деформации, либо в виде нагревания.

Рассмотрим, однако, этот вопрос с несколько иной стороны. На первый взгляд может показаться, что при описанных операциях нарушается закон сохранения массы. На самом деле это, конечно, не так: закон сохранения массы выполняется количественно точно и выражается он уравнением (15).

Отличие массы $\overset{*}{M_0}$ от массы M_0, которую мы назвали массой покоя, связано с тем, что шар K^* обладает избытком энергии по сравнению с шаром K. Это не значит, конечно, что энергия «превратилась» в массу; это значит только, что масса и энергия неразрывно связаны между собой и что поэтому всякому избытку энергии соответствует избыток массы и, наоборот, избытку массы — избыток энергии.

В случае идеально упругого тела кинетическая энергия полушарий K' и K'' превращается в энергию упругой деформации шара K^* с сохранением избытка массы Δm. В случае абсолютно неупругого тела кинетическая энергия упорядоченного движения полусфер K' и K'' при соударении превращается в кинетическую энергию хаотического движения молекул K^*, т. е. — в тепло, опять-таки с сохранением избытка массы Δm. Поскольку энергия тела есть однозначная функция состояния, такое же возрастание массы должно иметь место при нагревании на то же число градусов, каким бы способом это нагревание ни осуществлялось.

Отметим, что избыток массы Δm, выражаемый формулой (16), в нерелятивистском приближении (при $\frac{v}{c} \ll 1$) может быть представлен в виде (ср. с формулой (14))

$$\Delta m = \frac{1}{c^2}\,\frac{1}{2}\,M_0 v^2 = 2\,\frac{E_{\text{кин}}}{c^2}\,,$$

где под $E_{\text{кин}}$ разумеется кинетическая энергия каждого полушария (с массой покоя $\frac{1}{2}\,M_0$), движущегося со скоростью v, чем лишний раз подчёркивается, что масса неразрывно связана с любым видом энергии, не исключая кинетической энергии поступательного движения тела.

---

8. На основании сказанного, при любом обмене энергией, обусловлен ли этот обмен соударением или нагреванием, или поглощением света, происходит также обмен массой. Именно всякому изменению энергии ΔE соответствует изменение массы Δm, равное

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

Само собой разумеется, что вследствие огромной величины $c^2 = 9 \cdot 10^{20} \sim 10^{21}$ изменения массы при обычных процессах нагревания или соударения столь малы, что они никакого практического значения не имеют. Только при ядерных реакциях, где ΔE очень велики, Δm может приобретать и обычно приобретает измеримую величину. Общеизвестно, что именно таким путём в недавние годы соотношение между массой и энергией было подвергнуто экспериментальной проверке и подтвердилось самым безукоризненным образом. Более того, в настоящее время самый точный метод определения масс изотопов состоит именно в определении энергий ядерных реакций. Причина этого — в неизмеримо бо́льшей «чувствительности» энергетической характеристики процесса, нежели массовой характеристики. В самом деле, последняя в c^2 раз меньше первой. Замечу, наконец, что в ядерной физике, где приходится иметь дело с огромными энергиями, последняя часто измеряется в единицах массы, причём 1 массовая единица энергии равносильна 931 *Мэв*.

---

9. До сих пор мы пользовались в качестве примеров самыми простыми явлениями — такими, как удар идеально упругих или идеально неупругих шаров — и намеренно избегали обращаться к ядерным реакциям, которыми обычно пользуются при рассмотрении вопроса о связи между массой и энергией. Рассмотрим теперь как обстоит дело в случае ядерных процессов.

При рассмотрении соударения мы убедились в том, что масса тела зависит от его состояния. Мы видели, например, что массы идеально упругих шаров K и K^*, которые отличаются друг от друга только тем, что шар K^* обладает внутренней энергией упругой деформации, неодинаковы, хотя во всех остальных отношениях шары ничем друг от друга не отличаются. Аналогично обстоит дело и в случае ядерных процессов. Рассмотрим ядро, построенное из Z протонов и N нейтронов. Обозначим через M' сумму масс покоя этих элементарных частиц

$$M' = \sum_{i=1}^{Z} m_p^{(i)} + \sum_{K=1}^{N} m_n^{(k)}. \qquad (17)$$

Нетрудно убедиться в том, что масса ядра, в состав которого входят эти $Z+N$ частиц, не равна M'. В самом деле, при вычислении массы устойчивого ядра необходимо учитывать не только массы покоя, образующих его элементарных частиц, но и массу, соответствующую их энергии связи ΔE. Поскольку, однако, мы имеем дело с устойчивым ядром, его энергия связи отрицательна. Поэтому полная масса ядра M равна

$$M = \left(\sum m_p + \sum m_n\right) - \frac{\Delta E}{c^2} = M' - \frac{\Delta E}{c^2}. \qquad (18)$$

Итак, масса ядра меньше суммы масс нейтронов и протонов на величину $\frac{\Delta E}{c^2}$, т. е. — на величину массы, соответствующей энергии связи.

Рассмотрим теперь процесс образования ядра с несколько иной стороны. Пусть наши Z протонов и N нейтронов расположены сначала на большом расстоянии друг от друга. Полная масса всей системы будет просто равна сумме масс покоя

$$\sum m_p + \sum m_n,$$

так как до тех пор, пока элементарные частицы находятся на большом расстоянии друг от друга, их энергия взаимодействия равна нулю. Сблизим теперь эти частицы на расстояние порядка радиуса действия ядерных сил. При этом возникнет устойчивое ядро с массой M и освободится некоторое количество энергии ΔE (равное энергии связи с обратным знаком). Полная масса будет поэтому

$$M + \frac{\Delta E}{c^2}.$$

Закон сохранения массы даёт теперь

$$\sum m_p + \sum m_n = M + \frac{\Delta E}{c^2}$$

или

$$M = \left(\sum m_p + \sum m_n\right) - \frac{\Delta E}{c^2} = M' - \frac{\Delta E}{c^2},$$

т. е. снова равенство (18).

Если пространство, где происходит процесс образования устойчивого ядра, строго изолировано от окружающей среды, так что невозможен не только обмен веществом с этой внешней средой, но и обмен энергией, в какой бы форме эта энергия не освобождалась (включая жёсткие γ-лучи), то масса системы до и после реакции будет одна и та же: никакого превращения части массы в энергию не происходит. Если же система не будет изолирована или если изоляция будет неполной в том смысле, что будет предотвращена утечка вещества (т. е. частиц с конечной массой покоя), но останется возможной утечка энергии, то часть полной массы системы, равная $\frac{\Delta E}{c^2}$, «распылится» между окружающими телами, и эта часть будет потеряна для образовавшегося ядра.

Этот факт в бесчисленных популярных книгах и статьях до последнего времени обычно описывался как «превращение массы в энергию»*). Такая формулировка совершенно ошибочна: масса ни во что не превращается и не может превращаться, так как не существует массы без энергии и энергии без массы: то и другое свойство материи неразрывно связаны между собой**).

---

10. Рассмотрим теперь следующий важный вопрос: имеют ли место законы сохранения массы и энергии «раздельно» или на самом деле существует только один общий закон сохранения массы — энергии, а порознь эти законы несправедливы? По этому

---

*) Эта ошибочная формулировка даётся, к сожалению, и в моей маленькой книжке «Атомная энергия», вышедшей в 1946 г. Замечу, однако, что в моей большой книге «Атомная физика» ни в её первом издании (1944 г.), ни в последующих изданиях (1948 и след. годы) этой ошибки не встречается.

**) В общей печати иногда приходится встречать утверждение будто возникновение дефекта массы ΔM обязательно связано с образованием фотонов. Так, например, в статье С. Мелюхина «Масса и энергия» («Учительская газета» от 9 июля 1952 г.) читаем: «Так называемый „дефект массы“ (т. е. убыль массы) есть превращение части вещества в фотоны, которые также обладают специфичной (??) массой» или «...в ядерных реакциях определённая часть вещества превращается в излучение, в поле». Оба эти утверждения верны лишь в определённых частных случаях, а именно, в случае реакций (n, γ) или (p, γ). Как общие же положения эти утверждения неверны: существует огромное количество ядерных реакций, в которых никаких фотонов не возникает. Сюда относится, например, постоянно цитируемая реакция Li^7(p, α)He^4. В этой реакции дефект массы точно соответствует одной только кинетической энергии разлетающихся в противоположные стороны α-частиц. Поскольку, однако, соотношение $\Delta E = c^2 \Delta m$ верно для любого вида энергии, нет никакой надобности прибегать к противоречащему эксперименту допущению для объяснения дефекта массы.

поводу в популярной литературе существует большая путаница. В одних статьях вы встречаете утверждение, что имеет место только один закон. Но тогда остаётся непонятным, каким образом могли быть установлены в разное время и совершенно независимо друг от друга два закона: закон сохранения массы и закон сохранения энергии. В других статьях утверждается — особенно часто в последнее время, — что законы сохранения массы и энергии обязательно должны иметь место «раздельно». Этому утверждению придаётся даже философское значение: противоположное утверждение объявляется идеалистическим. Но тогда возникает тягостное противоречие с тем, что говорится в учебниках теоретической физики, где математически доказывается, что строгий закон сохранения, верный при любых энергиях, — один.

На самом деле, однако, эта коллизия — мнимая: при точной формулировке условий оба утверждения оказываются справедливыми. В качестве наиболее общего утверждения справедлива, конечно, теорема, доказываемая в учебниках теоретической физики, а именно, что строгий закон сохранения один. Нетрудно видеть, однако, что в релятивистском случае (т. е. когда v имеет любые значения вплоть до $v \cong c$) выполнение закона сохранения массы автоматически влечёт за собой выполнение закона сохранения энергии. Действительно, из равенства

$$\sum_i m_i = \text{const} \tag{19}$$

автоматически следует

$$c^2 \sum m_i = \sum m_i c^2 = \text{const}. \tag{20}$$

Первое из этих равенств выражает закон сохранения массы, второе — закон сохранения полной релятивистской энергии (отметим, что m_i — везде не масса покоя, но масса, соответствующая данной скорости). Справедливо, конечно, и обратное утверждение: если верно равенство (20), то из него путём деления обеих частей на c^2 получается (19). Поскольку оба равенства являются следствием одно другого, они дают *не два уравнения, а только одно.*

Обратимся теперь к так называемому нерелятивистскому случаю, т. е. к случаю, когда $\frac{v}{c} \ll 1$. При этом условии, как мы уже неоднократно видели, массу m_i, соответствующую скорости v, можно представить с достаточной точностью в виде суммы массы покоя и массы, соответствующей кинетической энергии

$$m_i = m_i^0 + \frac{1}{c^2}\,\frac{1}{2} m_i^0 v^2.$$

Поэтому левую часть закона сохранения массы можно также представить в виде суммы

$$\sum_i m_i^0 + \sum \frac{E_i}{c^2} = \text{const}, \tag{21}$$

где под E_i разумеется полная кинетическая энергия системы i масс. Но очевидно, что в нерелятивистском случае (точнее, в случае, когда энергия меньше m_0c^2) массы покоя частиц не могут меняться, вследствие чего первый член левой части постоянен и мы получаем вместо уравнения (19) два уравнения

$$\sum m_i^0 = \text{const}_1; \qquad \sum E_i = \text{const}_2 \tag{22}$$

— первое выражает закон сохранения массы, второе — закон сохранения энергии.

Наконец, последнее замечание в связи с законами сохранения. Если в системе происходят процессы, сопровождающиеся выделением энергии (например, химические реакции), то закон сохранения массы должен иметь место в виде (21), т. е. — с учётом массы, соответствующей освобождаемой энергии. Поэтому, строго говоря, масса в данной системе будет сохраняться только в том случае, когда приняты самые строгие меры к изоляции системы от окружающих тел. Однако во всех работах, доказавших закон сохранения массы, а именно, в опытах Ломоносова, Лавуазье, а также в последних опытах, выполненных Ландольтом уже в начале XX столетия, обеспечивалось отсутствие обмена веществом с окружающими телами, но не принималось никаких мер для обеспечения отсутствия обмена энергией. Тем не менее закон сохранения массы во всех случаях оказался выполненным, — разумеется, в пределах погрешности опыта. Здесь, конечно, также нет никакого противоречия. В самом деле, энергии, освобождаемые при обычных химических реакциях, соответствуют таким ничтожным массам (напоминаем, что множитель $\frac{1}{c^2}$, переводящий эрги в граммы, равен $\sim 10^{-21}$!), что ошибка от неучёта обмена энергией с огромным избытком покрывалась другими неизбежными ошибками эксперимента.

Иное дело ядерные реакции. В них освобождаются или поглощаются огромные энергии, и изоляция поэтому должна быть более строгой: должны быть приняты меры, препятствующие не только утечке вещества, но и утечке энергии, — в том числе и в виде энергии γ-лучей.

Если, однако, ставится задача об использовании энергии, освобождаемой при ядерных реакциях, то процесс следует вести таким образом, чтобы обеспечить возможно более полный и лёгкий отвод освобождаемой энергии. При этом масса продуктов реакции будет, разумеется, меньше суммы масс исходных веществ. Нехватающая масса не «исчезнет», не «превратится в энергию», но испытает «рассеяние», — т. ё. распределится между огромным числом тел, внешних по отношению к данной системе. Небезинтересно привести некоторые цифры. В так называемых ядерных реакторах или «котлах», где происходит ядерная цепная реакция, из каждого килограмма U^{235} получается около 989 *г* продуктов деления, около 10 *г* нейтронов и около 1 *г* рассеивается, будучи связано с кинетической энергией и энергией возбуждения продуктов деления. Из этого последнего одного грамма около 700 *мг* приходится на кинетическую энергию, а 100 *мг* в последующем превращении продуктов деления приходится на γ-излучение *). Ещё интереснее складываются обстоятельства в случае реакции $Li^7(p,\alpha)He^4$, которая по существу также является реакцией деления. Здесь продукты деления получаются в невозбуждённом состоянии. При $2\cdot10^7$ градусов K эта реакция может итти спонтанно со средним временем превращения 1 мин. Расчёт показывает, что на 1 *кг* смеси Li^7+H^1 должно получиться 997,5 *г* гелия — продукта реакции и 2,5 *г* приходится на кинетическую энергию, которая рассеивается в виде теплоты.

---

11. До сих пор все наши рассуждения относились к разностям энергии ΔE и соответственно — к разностям масс Δm: соотношение между массой и энергией мы намеренно писали в виде

$$\Delta E = c^2\,\Delta m.$$

Возникает естественный вопрос: можем ли мы это соотношение перенести также и на полную энергию, т. е. писать соотношение в виде

$$E = mc^2. \tag{23}$$

Что ответ на этот вопрос не очевиден, следует хотя бы из того, что в численное значение энергии входит произвольная постоянная. Заметим, что в соотношении (23) m, вообще говоря, не есть масса покоя, но масса, соответствующая скорости тела v, т. е.

$$E = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$

В нерелятивистском приближении $\left(\frac{v}{c}\ll 1\right)$ имеем:

$$E = m_0c^2 + \frac{1}{2}m_0v^2 + \frac{3}{8}\frac{m_0v^4}{c^2} + \cdots$$

и соответственно для массы

$$m = m_0 + \frac{1}{c^2}\frac{1}{2}m_0v^2 + \cdots$$

---

*) Цифры даны по книге «Научные и технические основы ядерной энергетики», под редакцией Гудмэна, т. I, ИЛ, 1948.

В этих формулах m_0c^2 можно рассматривать как нормированную определённым образом постоянную энергии, а m_0 есть инвариантная масса частицы, её **масса покоя**. Чтобы наши рассуждения приобрели максимальную отчётливость, предположим, что наш объект есть элементарная частица — электрон, протон и т. п. Вопрос наш теперь можно формулировать следующим образом: имеет ли постоянная m_0c^2 смысл энергии, которая соответствует массе покоя элементарной частицы? Другими словами: можем ли мы утверждать, что и с массой покоя электрона

$$m_0 = 9{,}106 \cdot 10^{-28}\ г$$

неразрывно связана энергия

$$m_0c^2 = 9{,}106 \cdot 10^{-28} \times 8{,}99 \cdot 10^{20}\ эргов = 0{,}5108\ Мэв?$$

Тот же самый вопрос можно поставить и для других элементарных частиц с отличной от нуля массой покоя. Ответ на этот вопрос прежде всего должен дать эксперимент. Хорошо известно, что в случае электрона такой ответ эксперимента имеется. Опыт показывает, что при определённых условиях происходит так называемая аннигиляция электрона и позитрона, т. е. исчезновение этой пары частиц и появление вместо них двух фотонов с энергией по 0,51 *Мэв* каждый. Рассматривая этот процесс с точки зрения закона сохранения массы, мы должны сказать, что масса полностью сохраняется, так как масса двух возникающих фотонов равна массе исчезающей пары электрон-позитрон. Равным образом и при обратном процессе «рождения» пары за счёт фотона с энергией 1,02 *Мэв* сохраняются и масса и энергия. В этом последнем случае пара частиц с конечной массой покоя возникает за счёт фотона — частицы, не имеющей массы покоя, но имеющей массу движения, которой точно соответствует энергия $2\,m_0c^2$, равная «энергии покоя» пары электрон-позитрон.

В настоящее время ещё нет экспериментальных доказательств аналогичных превращений протонов.

Однако для «рождения» пары протон-антипротон требуется энергия, по крайней мере в 1840 раз большая, нежели для рождения пары электрон-позитрон, т. е. энергия порядка миллиарда электрон-вольт.

С другой стороны, известно, что при соударениях частиц высоких энергий за счёт соответствующего избытка энергии возникают π-мезоны (с массой 270 *Мэв*). Недавно Ферми подверг теоретическому исследованию процессы, возможные при соударениях нуклеонов сверхвысоких энергий. Он показал, что при этих условиях следует ожидать с наибольшей вероятностью множественного возникновения π-мезонов; процессы возникновения пар нуклеон-антинуклеон также возможны, но сравнительно мало вероятны *).

Отметим ещё интересный случай спонтанного превращения частицы с неравной нулю массой покоя в пару фотонов. Речь идёт об открытом недавно нейтральном мезоне с массой покоя около 300 m_e. Эта частица спонтанно распадается на два фотона с очень коротким периодом полураспада $\tau \cong 10^{-14}$ сек.

Во всех рассмотренных случаях взаимные превращения элементарных частиц происходят с участием фотонов.

Это, однако, не обязательно: существуют явления, при которых элементарные частицы бо́льшей массы покоя «на лету» превращаются в другие элементарные частицы меньшей массы покоя, но обладающие соответственно бо́льшей кинетической энергией. Закон сохранения массы соблюдается и в этом случае при том, однако, условии, что учитывается масса, соответствующая кинетической энергии возникающей частицы. Такого рода явления наблюдаются при превращениях $\pi^{\pm}$-мезонов. Эти элементарные частицы обладают массой покоя 270 m_e (m_e — масса электрона); затормозившись в веществе, они превращаются в другие элементарные частицы — μ-мезоны (и нейтрино) с массой покоя 210 m_e и с кинетической энергией, непрерывно меняющейся от 0 до максимального значения, равного разности масс $\pi - \mu$, умноженной на c^2. В свою очередь μ-мезон спонтанно распадается на электрон и два нейтрино с соответствующим увеличением кинетической энергии **).

---

12. Нам осталось коротко остановиться на последнем вопросе: какое значение имеют описанные выше факты и теоретические соображения для самой важной физической и философской проблемы — проблемы материи. Прежде всего ясно, что нанесён непоправимый удар не только ньютонову определению массы, но и демокритовскому представлению об атомах как о маленьких неизменных тельцах, занимающих определённый объём, недоступный другим атомам. Мы знаем, что это ни в коем случае не колеблет материализм, так как мы помним слова Ленина: «Признание каких-либо неизменных элементов, „неизменной сущности вещей“ и т. п. не есть материализм, а есть *метафизический*, т. е. антидиалектический материализм» ***).

Нелишне отметить, что это крушение демокритовского представления об атомах произошло не только в сфере вопросов, относящихся к связи массы и энергии, но в самых разнообразных

*) См. Э. Ферми, УФН, т. XLI, стр. 71, 1952.

**) См. подробный обзор Поуэлла, Мезоны, УФН, т. XLV, стр. 15, 1951.

***) В. И. Ленин, Сочинения, 4-е изд., т. 14, стр. 248.

конкретных проблемах физики. Когда современный физик обсуждает проблемы соударений — соударений электронов с атомами, атомов между собой, соударений нейтронов или протонов с ядрами — он никогда не рассматривает эти процессы как геометрическое соприкосновение круглых частиц. Напротив, он всегда изучает взаимодействие полей, с которыми связаны эти частицы; он вводит представление об «эффективных» сечениях, которые имеют лишь самое косвенное отношение к «размерам» атомов или ядер, так как они в одних случаях оказываются значительно меньшими «геометрических» размеров частиц, а в других — превышают их в десятки тысяч раз. Нечего и говорить о том, что весь экспериментальный фундамент квантовой механики — волновые свойства свободных частиц, «просачивание» через потенциальные барьеры — находится в непримиримом противоречии с демокритовскими атомами-тельцами.

Представляется несомненным, что эти, а также и особенно интересующие нас сегодня и описанные выше факты могут найти естественное истолкование в рамках полевой теории материи. Согласно этой теории, которая пока ещё является скорее программой, нежели законченной теорией, не частицы создают поле, но сами они порождаются полем; они являются своеобразными «квантами» поля, иногда имеющими конечную массу покоя, иногда — как в случае фотонов — не имеющими её. Этой теории предстоит ещё решить вопрос о том, почему поле имеет «зернистую» структуру, порождая дискретные элементарные частицы и атомы. Представление это не ново. Уже давно делались попытки, например, так изменить уравнения Максвелла, чтобы существование электронов вытекало из них как следствие, а не вносилось в теорию в качестве экспериментально обоснованного постулата. Затем эти взгляды были основательно забыты, и только в самые последние годы они вновь были формулированы и развиты советскими физиками — Д. И. Блохинцевым и Я. И. Френкелем*). В данный момент эта теория ещё далека от завершения. Повидимому, однако, будущее развитие теории материи пойдёт именно в этом направлении.

*) См. статьи Д. И. Блохинцева, УФН, т. XLII, стр. 76, 1950; УФН, т. XLIV, стр. 104, 1951, а также Я. И. Френкеля, УФН, т. XLII, стр. 69, 1950; УФН, т. XLIV, стр. 112, 1951.