

Так как электромагнитная теория Максвелла с исторической точки зрения была самой ранней теорией поля, достигшей высокой степени последовательности и логической зрелости, то не удивительно, что современное развитие понятия массы внутренне связано с различными фазами этой теории. Не только электромагнитное понятие массы, как это предполагается в самом названии, развито из этой теории, но, как мы уже видели в предыдущей главе, и понятие массы в теории относительности исторически и по существу¹ возникло из того же источника. Электромагнитная теория Максвелла выдвинула также, хотя и менее непосредственным образом, другое понятие массы, названное одним из величайших открытий двадцатого века².

Максвелл показал, что работа, необходимая для создания электромагнитного поля, может рассматриваться как эквивалентная энергии, образованной в пространстве и обладающей плотностью w ,

$$w = \frac{1}{8\pi} (\mathbf{E}^2 + \mathbf{H}^2), \quad (1)$$

где \mathbf{E} — вектор электрического поля, \mathbf{H} — вектор магнитного поля. Эта формула применима также и к нестатическому полю, где в соответствии с законом сохранения энергии она должна течь из одного места в другое, чтобы компенсировать изменения, происходящие в данной области пространства. Энергия, переносимая

¹ Так как уравнения Лоренца, будучи основой для вывода зависимости массы от скорости, описывают те преобразования, по отношению к которым уравнения Максвелла являются ковариантными.

² E d m u n d W h i t t a k e r, History of the theories of aether and electricity (Nelson, Glasgow, 1953), vol. 2, p. 51.

в единицу времени через единицу площади, как показал Д. Г. Пойнтинг в 1884 году³, дается вектором

$$\mathbf{S} = \frac{c}{4\pi} \mathbf{E} \times \mathbf{H}.$$

Правда, еще до Пойнтинга перенос энергии ассоциировался с электрическим током, но при этом электрическая энергия рассматривалась как заключенная в проводник, по которому она передавалась. В теории потока энергии Пойнтинга перенос энергии больше не связывался с проводником. Область распространения энергии — это окружающая среда или пустое пространство. Энергия, таким образом, отрывается от материи, поднимая свой онтологический статус от простого случайного свойства механической или физической системы до независимого ранга автономного существования, а материя перестает быть необходимым проводником для ее переноса.* В результате такого изменения, приведшего к эмансипации энергии, мысль о том, что физическое значение имеет только разница в энергии, должна быть отброшена, и, как мы увидим позднее, энергии необходимо приписать абсолютное значение. В противоположность другим теориям, а именно теориям дальнего действия, согласно которым энергия исчезает в точке *A* пространства и появляется в точке *C* при отсутствии какого-либо процесса в промежуточной точке *B*, новая теория электромагнитного поля наделяет энергию непрерывным существованием как во времени, так и в пространстве. Комментируя идеи Пойнтинга, Лодж выражает это следующим образом:

«Согласно новому допущению, мы можем пометить кусок энергии и проследить его движение и изменение его формы, подобно тому как мы можем пометить кусок материи, чтобы узнать его в другом месте и при других обстоятельствах; и путь, по которому движется энергия, можно обсуждать с такой же определенностью, с какой мы говорим о ее непрерывном существовании, и это подобно тому ощущению, с каким мы обсуждаем маршрут несколько задержавшегося багажа, который прибыл на станцию назначения, но в несколько потрепанном и преобразованном виде»⁴.

³ «Philosophical Transactions», 175, 343 (1884).

⁴ Oliver Lodge, On the identity of energy in connection with Mr. Poynting's paper on the transfer of energy in an electromagnetic field; and on the fundamental forms of energy, «Philosophical Magazine», 19, 482 (1885).

Такой взгляд на природу энергии не был, однако, общепринятым. Например, Герц в своем «Исследовании о распространении электрической силы»⁵ все еще ставит вопрос о физическом смысле утверждений о локализации энергии или о непрерывности ее распространения. «Так как исследования такого рода, — говорит он, — до сих пор не проведены даже по отношению к простым энергетическим превращениям в самой обычной механике (однако такая возможность допускается. — *М. Д.*), неясность понятий, связанная с таким рассмотрением, еще требует своего разъяснения»⁶. Гельм поддержал Герца в его требовании дальнейшего исследования проблемы, если рассматривать перенос энергии как реальный физический процесс. Если, однако, такой перенос представлять себе просто как аналогию или как некоторое словесное описание уравнения

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\operatorname{div} S, \quad (2)$$

то при этом не возникает никаких концептуальных трудностей. Гельм отвергает первую альтернативу, так как он полагает, что приписывание энергии субстанциального существования означает «сомнительное отклонение от ясных и отчетливых первоначальных концепций Роберта Майера. Ничто не является абсолютным, только отношения доступны науке»⁷.

Программа, которую наметил Герц, была выполнена — по крайней мере для механики упруго деформируемых тел — Густавом Ми в его «Очерке общей теории энергетических превращений»⁸. В этой публикации, важность которой для развития современной физики едва ли можно переоценить, Ми показал, что не только жидкость, движущаяся под давлением, перемещается путем передачи энергии и переносит энергию пропорционально своему

⁵ Heinrich Hertz, Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft, «Gesammelte Werke» (Leipzig, 1894), Bd. 2, S. 234.

⁶ Ibid., S. 293.

⁷ Georg Helm, Die Energetik nach ihrer geschichtlichen Entwicklung (Leipzig, 1898), S. 362: «Es existiert kein Absolutes, nur Beziehungen sind unserer Erkenntnis zugänglich».

⁸ Gustav Mie, Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung, «Wiener Sitzungsberichte», 107, 1113—1182 (1898).

давлению и скорости, но также любая деформация упруго сжатого тела порождает энергетический поток строго определенной величины. Так, в приводном ремне, соединяющем мотор с машиной, потребляющей энергию, энергетический поток, текущий в направлении, противоположном движению натянутой части ремня, является математически строго определенной величиной. Показывая универсальную применимость уравнения непрерывности (2), Ми заявляет, что энергия может быть легко представлена как жидкость, распространяющаяся в пространстве, с плотностью w и текущая потоком плотности S . «Все энергетические изменения являются, следовательно, реальными энергетическим потоками»⁹. Однако Ми не делал отсюда окончательных выводов. Материя и энергия были для него различными аспектами физической реальности. Сходство между его результатами относительно потока энергии и гидродинамическим уравнением непрерывности было, с его точки зрения, только случайным¹⁰.

«Скорость материального объекта, находящегося в движении, может быть установлена на основании инерционных эффектов, таких, как удар, центробежные силы и т. п. Эти эффекты делают возможным измерение скорости жидкости, находящейся в движении, не обращаясь, например, к помощи измерений интенсивности потока. Никто, однако, не говорит об инерции энергии, находящейся в движении»¹¹.

Только два года спустя Пуанкаре опубликовал статью, озаглавленную «Теория Лоренца и принцип противодействия»¹², в которой он характеризовал электромагнитную энергию как «поток, обладающий энергией». Он впервые показал, что электромагнитное излучение обладает общим импульсом, равным вектору Пойнтинга, деленному на квадрат скорости света:

$$g = S/c^2. \quad (3)$$

⁹ Ibid., S. 1129. Точное определение понятия «wirklicher Energiestrom» см. во ввводной части к указанной статье.

¹⁰ Ibid.: «Ich bemerke dabei ausdrücklich, dass die Ähnlichkeit zwischen diesem Satz und dem von der Continuität der Masse nur eine ganz äusserliche ist».

¹¹ Ibid., S. 1121: «Niemand hat aber jemals von einer Trägheit bewegter Energie gesprochen».

¹² Henri Poincaré, La théorie de Lorentz et le principe de réaction, «Archives Néerlandaises des sciences exactes et naturelles», 2, 232 (1900).

Положив в таком случае S равным Ec , где E — электромагнитная энергия, поглощенная телом с массой m , он применил закон сохранения импульса для вычисления скорости отдачи поглощающего тела:

$$mv = S/c^2 = (E/c^2) c. \quad (4)$$

Таким образом, масса или инерция электромагнитного излучения на основании анализа размерностей в уравнении (4) равна E/c^2 . Однако Пуанкаре возражает против той идеи, что эта масса обладает характером неразрушимой субстанции. Он говорит:

«Мы можем рассматривать электромагнитную энергию как фиктивную жидкость, плотность которой w и которая перемещается в пространстве в соответствии с законом Пойнтинга. Необходимо только допустить, что эта жидкость неразрушима»¹³.

Сравнительно недавно Айвс в своей статье, озаглавленной «Определение соотношения между массой и энергией»¹⁴, детально перестроил статью Пуанкаре в свете «принципа относительности Пуанкаре»¹⁵ и показал, что аргументы Пуанкаре, если только следовать их конечным выводам, с необходимостью ведут к следующему соотношению между электромагнитной энергией и инерцией:

$$m = E/c^2, \quad (5)$$

где m — изменение инертной массы, а E — рассматриваемая энергия (поглощенная или испущенная).

В 1904 году Газенэрль¹⁶ показал, что электромагнитная энергия E , заключенная в пустой полости с идеально отражающими стенками, ведет себя, когда полость находится в движении, как если бы она имела массу, пропорциональную E ¹⁷.

¹³ Ibid., p. 256.

¹⁴ «Journal of the Optical Society of America», 42, 540—543 (1952).

¹⁵ См. Henri Poincaré, L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique, «Congress of Arts and Sciences» (St. Louis, September 24, 1904); перепечатано в: «La Revue des Idées» (November 15, 1904).

¹⁶ Fritz Hasenöhrle, Zur Theorie der Strahlung in bewegten Körpern, «Annalen der Physik», 15, 344—370 (1904); 16, 589—592 (1905); «Wiener Sitzungsberichte», 113, 1039 (1904).

¹⁷ В статье 1904 года коэффициент пропорциональности был равен $8/3 c^2$; в статье 1905 года — $4/3 c^2$.

Обычно говорят, что «с полной общностью теорема об инертности энергии была впервые установлена Эйнштейном в 1905 г.»¹⁸. При этом ссылаются на статью Эйнштейна «Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии?»¹⁹. На основе уравнений электромагнитного поля Максвелла — Герца Эйнштейн утверждает, что «если тело отдает энергию E в виде излучения, то его масса уменьшается на E/c^2 »²⁰. Обобщая этот результат на все энергетические превращения, Эйнштейн заключает: «Масса тела есть мера содержащейся в нем энергии»²¹.

Курьезным случаем в истории научного мышления является тот факт, что собственный вывод Эйнштейном формулы $E = mc^2$, как он дан в его статье в «Annalen der Physik», был логически ошибочным. Действительно, то, что для неспециалиста известно как «наиболее знаменитая математическая формула из когда-либо открытых» в науке²², было всего лишь результатом *petitio principii*, то есть аргументом, основанным на выводе из положения, которое само еще требует доказательства. Разумеется, это утверждение ни в малейшей степени не умаляет важности вклада Эйнштейна в эту проблему, так как соотношение между массой и энергией есть необходимое следствие теории относительности и может быть выведено из фундаментальных принципов этой теории различными способами, а не только с помощью того метода, который применил Эйнштейн в своей первоначальной публикации. Логическая необоснованность вывода Эйнштейна была показана Айвсом²³.

Вывод Эйнштейна базируется на сравнении общей и кинетической энергии тела и лучистой энергии в двух системах отсчета — S и S' . В системе отсчета S тело находится в покое; по отношению к системе S' тело движется со скоростью v . Если E_0 и E'_0 представляют собой общую энергию тела перед излучением соответственно

¹⁸ Макс Борн, Атомная физика, М., 1965, стр. 72.

¹⁹ Альберт Эйнштейн, Собрание научных трудов, т. I, М., 1965, стр. 36—38.

²⁰ Там же, стр. 38.

²¹ Там же.

²² William Cahn, Einstein (Citadel Press, New York, 1955), p. 26.

²³ «Journal of the Optical Society of America», 42, 540—543 (1952).

по отношению к системам S и S' , а E_1 и E'_1 — соответственно энергию после излучения, T'_0 и T'_1 — кинетическую энергию тела по отношению к системе S' перед и после излучения, а E — лучистую энергию излучения, подсчитанную в системе S , тогда, как справедливо доказал Эйнштейн,

$$(E'_0 - E_0) - (E'_1 - E_1) = E \left[\frac{1}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} - 1 \right]. \quad (6)$$

Если, далее, m_0 и m_1 обозначают массу тела относительно системы соответственно до и после излучения, то

$$T'_0 = m_0 c^2 \left[\frac{1}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} - 1 \right] \quad (7)$$

и

$$T'_1 = m_1 c^2 \left[\frac{1}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} - 1 \right]. \quad (8)$$

Эйнштейн в этом пункте ошибочно полагает $E'_0 - E_0$ равной $T'_0 + C$ (C является константой) и $E'_1 - E_0$ равной $T'_1 + C$, и таким образом получает посредством вычитания и на основании уравнения (6)

$$T'_0 - T'_1 = E \left[\frac{1}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} - 1 \right] \quad (9)$$

и в качестве приближения

$$T'_0 - T'_1 = \frac{1}{2} \frac{E}{c^2} v^2. \quad (10)$$

Принимая во внимание уравнения (7) и (8), он должен был бы получить

$$T'_0 - T'_1 = (m_0 - m_1) c^2 \left[\frac{1}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} - 1 \right], \quad (11)$$

которое в комбинации с уравнением (6) должно дать

$$(E'_0 - E_0) - (E'_1 - E_1) = \frac{E}{(m_0 - m_1) c^2} (T'_0 - T'_1), \quad (12)$$

или прийти к тому, чтобы рассматривать следующие два отношения как различные:

$$E'_0 - E_0 = \frac{E}{(m_0 - m_1) c^2} (T'_0 + C)$$

$$E'_1 - E_1 = \frac{E}{(m_0 - m_1) c^2} (T'_1 + C). \quad (13)$$

Сравнивая уравнение (13) с допущением Эйнштейна, а именно

$$E'_0 - E_0 = T'_0 + C \text{ и } E'_1 - E_1 = T'_1 + C$$

(в статье Эйнштейна кинетическая энергия T обозначается через K , а энергия излучения E — через L), мы видим, что Эйнштейн произвольно допускает, что

$$\frac{E}{(m_0 - m_1) c^2} = 1, \quad (14)$$

которое, строго говоря, требует доказательства²⁴.

Эквивалентность массы и энергии в теории относительности для случая изменения кинетической энергии легко может быть показана следующим образом. Приращение кинетической энергии dE_k дается произведением силы F и смещения ds :

$$dE_k = F ds = \frac{d(mv)}{dt} ds = v d(mv) = v^2 dm + mv dv. \quad (15)$$

Используя уравнение преобразования массы $m = m_0 \times (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, мы получаем после возведения в квадрат и соответствующих упрощений

$$m^2 c^2 = m^2 v^2 + m_0^2 c^2, \quad (16)$$

которое после дифференцирования и сокращения общего множителя $2m$ дает

$$c^2 dm = v^2 dm + mv dv. \quad (17)$$

Сравнение с уравнением (15) показывает, что

$$dE_k = c^2 dm, \quad (18)$$

²⁴ Я должен заметить, однако, что, кроме цитированной статьи (сноска 19), Эйнштейн доказывает эквивалентность массы и энергии в следующих статьях: «Закоп сохранения движения центра тяжести и инерция энергии»; см. Альберт Эйнштейн, Собрание научных трудов, т. I, стр. 39—44; «Об инерции энергии, требуемой принципом относительности», там же, стр. 53—64; «Элементарный вывод эквивалентности массы и энергии», там же, т. II, стр. 416—423.

и после интегрирования

$$E_k = mc^2 - m_0c^2. \quad (19)$$

Если m_0c^2 можно интерпретировать как некоторую форму энергии, как энергию строения или энергию покоя, или если вся энергия может быть сведена к ее кинетической форме, то в таком случае масса и энергия были бы только различными названиями для одной и той же физической сущности*. Хотя физика могла еще показать, что только электромагнитная энергия излучения и кинетическая энергия обладают инерцией, философы поспешили обобщить эти результаты и стали утверждать универсальную тождественность массы и энергии. Среди наиболее ревностных проповедников этой идеи были представители монистической школы мышления, которые воспользовались такой возможностью в своих поисках единой концептуальной модели мира. Так, Густав Лебон в книге, опубликованной в 1905 году, говорил о «дематериализации материи и превращении ее в энергию»²⁵, а Оливье провозгласил в 1906 году: «Масса тела есть синоним его энергии»²⁶. Позднее Бертран Рассел в своей хорошо известной работе «Человеческое познание» заявил:

«Масса есть только форма энергии, и нет основания думать, что материя не может растворяться в других формах энергии. Не материя, а энергия является основоположной в физике»²⁷.

Но как часто случается, философия с присущей ей тенденцией к обобщению предвосхищает и предсказывает результаты, разработка и подтверждение которых еще остаются предметом немалых усилий со стороны точных наук. Как заметил однажды Уайтхед, «философия строит соборы еще до того, как рабочие заложили камень».

²⁵ Густав Лебон, Эволюция материи, СПб, 1909, стр. 71. Утверждение Геннемана, что «динамический атомизм» Шеллинга (1775—1854) «находит в уравнении $E = mc^2$ удивительное подтверждение», является, на мой взгляд, незаконным перенесением современных научных концепций в послекантовский идеализм, который благодаря спекулятивной природе и темному языку сам способствовал разнообразным интерпретациям. См. Gerhard Henneemann, Naturphilosophie im 19. Jahrhundert (Verlag Karl Albert, Freiburg and Munich, 1959), S. 36.

²⁶ Julius von Olivier, Monistische Weltanschauung (Naumann, Leipzig, 1906), S. 2.

²⁷ Бертран Рассел, Человеческое познание, его сфера и границы, М., 1957, стр. 327.

Действительно, физика прошла долгий путь, прежде чем была показана универсальная тождественность массы и энергии. Макс Планк ²⁸ в 1907 году дал правильный вывод соотношения между массой и энергией, основанный на импульсе излучения Пуанкаре. В 1908 году Комшток на основе электродинамических соображений показал, что формула $E = 3/4 mc^2$ находится в согласии с первоначальными результатами Томсона и Газенэрля ²⁹. В том же году Льюис в статье, озаглавленной «Пересмотр фундаментальных законов материи и энергии» ³⁰, путем вывода из теории давления излучения получил уравнение $dE = c^2 dm$. Поль Ланжевен в 1913 году впервые применил соотношение между массой и энергией к ядерной физике в своем объяснении отклонения атомных весов от целых чисел ³¹. Ленц ³², Зоммерфельд ³³ и Смекаль ³⁴ были первыми из тех, кто понял всеобщее значение этого соотношения для ядерной физики.

Вопрос о том, с какой степенью точности первоначальные количественные измерения в ядерных реакциях подтверждали соотношение между массой и энергией, подробно обсуждался Бейнбриджем в 1933 году ³⁵.

Несмотря на общее признание соотношения между массой и энергией как формулы с универсальным значением, оставался еще открытым вопрос, может ли вся масса без остатка превращаться в энергию. Окончательный утвердительный ответ на этот вопрос был дан в 1933

²⁸ «Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften, physik.-mathem. Klasse», 13 (June 1907).

²⁹ Daniel F. Comstock, The relation of mass to energy, «Philosophical Magazine», 15, 1—21 (1908).

³⁰ «Philosophical Magazine», 16, 705—717 (1908).

³¹ П. Ланжевен, Избранные произведения, М., 1949, стр. 216—254.

³² W. Lenz, Über ein invertiertes Bohrsches Modell, «Sitzungsberichte der mathem.-phys. Klasse der K. B. Akademie der Wissenschaften zu München» (1918), S. 355—365.

³³ Arnold Sommerfeld, Atombau und Spektrallinien (Brunswick, 1919), S. 538.

³⁴ Adolf Smekal, Über die Dimensionen der α -Partikel, «Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien», 129, 455—481 (1920).

³⁵ Kenneth T. Bainbridge, The equivalence of mass and energy, «Physical Review», 44, 123 (1933).

году Блэккетом и Оккиалини ³⁶ в их знаменитых экспериментах по образованию пар и на основании симметричного отображения этого явления, а именно аннигиляции материи. В 1934 году Клемперер ³⁷ показал, что позитрон и электрон могут аннигилировать и тем самым произвести энергию, по величине равную $2m_0c^2 (= 10^6 \text{ ev})$. Сравнительно недавно многочисленные эксперименты с антипротонами и антинейтронами принесли дальнейшее подтверждение этому открытию. Не будет преувеличением сказать, что развитие современной ядерной физики было бы невозможно без использования эквивалентности массы и энергии. Браунбек ³⁸ показал в 1937 году, что экспериментальная проверка этого соотношения столь основательна, что эквивалентность массы и энергии не следует больше рассматривать как теорему, выводимую из других принципов, имеющих менее непосредственное и менее строгое эмпирическое подтверждение, но она, подобно закону сохранения энергии, должна быть взята в качестве одного из фундаментальных принципов физики.

Новое понимание, достигнутое в теории относительности и подкрепленное ядерной физикой, пролило свет на понятие энергии. Прежде всего, так как материя превращается в энергию *, энергия благодаря этому потеряла свою классическую неопределенность, если иметь в виду аддитивную константу. Она стала физической величиной с абсолютным значением. Электромагнитное понятие массы предстало в новом свете. Открылась возможность понять, что в действительности делали Томсон, Хевисайд, Лоренц, Вин и Абрагам. Стало ясно, что они имели дело с релятивистской динамикой поля ³⁹. Благодаря смеще-

³⁶ P. M. S. Blackett and G. P. S. Occhialini, «Proceedings of the Royal Society», London, 139, 699 (1933).

³⁷ O. Klemperer, Annihilation radiation of the positron, «Proceedings of the Cambridge Philosophical Society», 30, 347—354 (1934); M. Deutsch, Annihilation of swift positrons, «Physical Review», 72, 729—730 (1947).

³⁸ Werner Braunbeck, Die empirische Genauigkeit des Mass-Energie Verhältnisses, «Zeitschrift für Physik», 107, 1—11 (1937).

³⁹ Необходимо заметить, что уравнения Максвелла являются лоренц-ковариантными, если относящиеся сюда величины рассматриваются как компоненты мировых векторов или мировых тензоров.

нию электрического заряда электростатическое поле порождает магнитное поле, и оба эти поля производят поток энергии и импульса. Не удивительно поэтому, что сторонники электромагнитного понятия материи выводили существование инерции пропорциональной E/c^2 . Оставалось не ясным, почему в действительности они пришли к выводу, что $m = (4/3)E/c^2$ ⁴⁰, а не $m = Ec^2$, как того требует теория относительности.

Интересно отметить, что прошло более 15 лет, прежде чем был достигнут прогресс в разъяснении причин этого расхождения, и возможно, даже в настоящее время это разногласие не выяснено окончательно. В 1922 году Ферми в статье, озаглавленной «Исправление серьезного расхождения между теорией электромагнитной массы и теорией относительности»⁴¹, а позднее, в 1936 году, Вильсон в статье «Масса конвекционного поля и закон массы-энергии Эйнштейна»⁴² пытались решить проблему, принимая во внимание воздействие материального субстрата поля и упругие напряжения в окружающей среде. Подобно тому как энергетический поток в натянутом ремне (как об этом говорилось выше в связи с теорией Ми) устанавливается в направлении, противоположном направлению движения ремня, точно так же и движение заряженной частицы производит энергетический поток, который добавляет к общему импульсу отрицательный член. Инерция системы поэтому уменьшается благодаря (отрицательному) поправочному члену, равному приблизительно $e^2/6\pi\epsilon_0 c^2$, то есть одной трети энергии поля частицы, так что величина общей инерции в соответствии с теорией относительности становится равной $m = E/c^2$. Этот подход к согласованию электромагнитной теории массы Абрагама — Лоренца с теорией относительности остается, однако, неудовлетворительным, поскольку отделение неэлектромагнитных сил от электромагнитных не является лоренц-инвариантным. Причина этой несовме-

⁴⁰ См., например, результат Хевисайда, гл. XI, уравнение (6).

⁴¹ Enrico Fermi, *Correzione di una grave discrepanza tra la teoria delle masse elettromagnetiche e la teoria della relatività*, «Rendiconti dei Lincei», 31, 184—187, 306—309 (1922).

⁴² W. Wilson, *The mass of a convected field and Einstein's mass-energy law*, «Proceedings of the Physical Society», 48, 736—740 (1936).

стимости теории Абрагама — Лоренца с нашей современной точкой зрения лежит в определении электромагнитной массы Абрагамом в терминах энергии поля, суммированной по пространству только вне (изменяемого) объема (движущейся) частицы, в то время как релятивистски правильное определение должно основываться на общем тензоре энергии-импульса, который включает в себя тензор материи.

Как мы уже видели, превращение электронно-позитронной пары, например, в гамма-излучение или явление, симметричное этому превращению, представляет собой неоспоримое экспериментальное подтверждение положения теории относительности о том, что масса и энергия взаимным образом и полностью превратимы друг в друга*.

Такая ситуация вызывает следующие фундаментальные вопросы. Не являются ли две взаимно изменяющиеся сущности одной и той же сущностью? Не является ли тождеством то, что обычно называют эквивалентностью? Поэтому не будут ли масса и энергия просто синонимами для одной и той же физической реальности, которая — по аналогии с термином «волница», придуманным Эддингтоном для описания электрона с точки зрения корпускулярно-волнового параллелизма в волновой механике, — может быть названа «массэргией»?

Для того чтобы дать удовлетворительные и исчерпывающие ответы на эти вопросы, необходимо принять во внимание следующие соображения. В дорелятивистской физике особенно важное значение имели три основных закона сохранения: 1) сохранение импульса (ньютоновский закон сохранения центра тяжести: см. гл. XII), 2) сохранение массы (закон Лавуазье; см. гл. VIII) и 3) сохранение энергии (Роберт Майер, 1842 год, и Герман Гельмгольц, 1847 год). Если учесть, что импульс есть трехмерная векторная величина, то эти законы сохранения образуют пять уравнений или условий, которым должен подчиняться любой физический процесс.

В теории относительности взамен этого имеется только один закон сохранения: сохранение четырехмерного вектора энергии-импульса P^μ . Это равносильно четырем уравнениям или условиям. Так, вместо двух отдельных дорелятивистских законов сохранения массы и энергии в теории относительности имеется только *один* закон

сохранения массы или энергии («массэргии»). В особенности нарушается строгая выполнимость закона Лавуазье. Так как теплота реакции Q в качестве энергии также имеет массу, то ясно, что в экзотермической реакции (дорелятивистская) масса уменьшается, а в эндотермической реакции — увеличивается.

Рассмотрим, например, кинетическое действие между двумя взаимодействующими молекулами с массами m_{01} и m_{02} , появляющимися после взаимодействия с массами m_{03} и m_{04} . Предположим для простоты, что движение совершается по направлению оси x , так что закон сохранения импульса содержит только одно уравнение. Опишем явление сначала на основании дорелятивистских представлений, а затем на основании представлений теории относительности.

На основании дорелятивистской интерпретации мы имеем:

Сохранение массы, или закон Лавуазье:

$$m_{01} + m_{02} = m_{03} + m_{04}. \quad (20)$$

Сохранение импульса:

$$m_{01}v_1 + m_{02}v_2 = m_{03}v_3 + m_{04}v_4. \quad (21)$$

Сохранение энергии:

$$\frac{1}{2} m_{01}v_1^2 + \frac{1}{2} m_{02}v_2^2 = \frac{1}{2} m_{03}v_3^2 + \frac{1}{2} m_{04}v_4^2 + Q. \quad (22)$$

В этих уравнениях v_n представляет собою скорость частицы, обладающей массой m_{0n} , а Q — теплоту реакции (положительная или отрицательная). Если m_{0n} и v_n даны для $n = 1, 2, 3$, тогда m_{04} определяется на основании уравнения (20), v_4 — из уравнения (21), а Q — с помощью уравнения (22).

На основании интерпретации теории относительности мы имеем:

Сохранение четырехмерного вектора энергии-импульса:

$$P_1^\mu + P_2^\mu = P_3^\mu + P_4^\mu. \quad (23)$$

Если U_n^k является k -ой компонентой четырехмерного вектора частицы, имеющей массу m_{0n} , то уравнение (23)

дает для пространственных компонент при $\mu = 1$

$$m_{01}U_1^1 + m_{02}U_2^1 = m_{03}U_3^1 + m_{04}U_4^1. \quad (24)$$

Так как в нашем случае $U_n^k = v_n(1 - v_n^2/c^2)^{-1/2}$, мы получаем

$$\frac{m_{01}v_1}{(1 - v_1^2/c^2)^{1/2}} + \frac{m_{02}v_2}{(1 - v_2^2/c^2)^{1/2}} = \frac{m_{03}v_3}{(1 - v_3^2/c^2)^{1/2}} + \frac{m_{04}v_4}{(1 - v_4^2/c^2)^{1/2}} \quad (25)$$

и для $\mu = 4$ (временные компоненты)

$$\frac{m_{01}c^2}{(1 - v_1^2/c^2)^{1/2}} + \frac{m_{02}c^2}{(1 - v_2^2/c^2)^{1/2}} = \frac{m_{03}c^2}{(1 - v_3^2/c^2)^{1/2}} + \frac{m_{04}c^2}{(1 - v_4^2/c^2)^{1/2}}. \quad (26)$$

Уравнение (25) выражает сохранение импульса, а уравнение (26) — сохранение массы или энергии («массэргии») ⁴³. Необходимо заметить, что в уравнении (26) нельзя добавить никакого дополнительного члена, так как уравнение устанавливает сохранение общей энергии. Допустим теперь на некоторый момент, что закон Лавуазье

$$m_{01} + m_{02} = m_{03} + m_{04} \quad (27)$$

справедлив также и в релятивистской физике. И пусть m_0 и v_n будут даны для $n = 1, 2$ и 3 . Тогда m_{04} определится при помощи уравнения (20) а v_4 — при помощи уравнения (25). Но в таком случае уравнение (26) будет вообще несовместимым с предшествующими уравнениями. Итак, динамика теории относительности, признавая изменяемость собственной массы в процессах взаимодействия между частицами системы, опровергает закон Лавуазье*.

Интересно отметить, что в конце прошлого столетия, задолго до появления теории относительности, строгая выполнимость закона Лавуазье была уже поставлена под сомнение. Крейхгауэр, возможно, был первым, кто в 1890—1891 годах выразил сомнение относительно абсолютной выполнимости этого закона на основании результатов некоторых экспериментов с реакциями, содержа-

⁴³ В выводе уравнения (26) из уравнения (24) обычно используются следующие соотношения:

$$P_1^4 = m_{01}U_1^4 = m_{01} \frac{dx_1^4}{ds} = \frac{m_{01}}{(1 - v_1^2/c^2)^{1/2}} \frac{d(ict)}{cdt} = \frac{m_{01}c^2}{(1 - v_1^2/c^2)^{1/2}}$$

и соответствующие соотношения для P_2^4, P_3^4, P_4^4 .

щими ртуть, бром и йод⁴⁴. Несколько позднее Г. Ландольт начал свою серию экспериментов по восстановлению сернокислого серебра, в ходе которых, как думал он, обнаружилось ощутимое различие между массами до реакции и после реакции⁴⁵. Эти различия, по его мнению, были больше, чем ошибки, которые можно было бы приписать его методу взвешивания. Проблема, далее, была исследована Гензелем⁴⁶ и Хейдвейлером⁴⁷, которые пришли к выводу, что «может быть с определенностью установлено, что имеет место различие в массах в случае реакции железа на медном купоросе»⁴⁸. Те, кто твердо верил в справедливость закона Лавуазье, пытались объяснить эти расхождения вторичными эффектами. Так, например, утверждалось, что в тех экспериментах, где имели дело с соединениями железа, расхождения представляли собой проявление еще неизвестной связи между электромагнитными и гравитационными силами, причем возможность такой связи предполагалась уже Фарадеем⁴⁹. Позднее, однако, было выяснено, что эффекты плавучести, возникающие благодаря тепловому расширению сосудов с образцами, приводят к неточностям процесса взвешивания⁵⁰.

В настоящее время известно, что любая обычная процедура взвешивания, известная в прошлом веке или

⁴⁴ «Verhandlungen der physicalischen Gesellschaft zu Berlin» 10, 13—16 (1891).

⁴⁵ H. L a n d o l t, Untersuchungen über etwaige Änderungen des Gesamtgewichtes chemisch sich umsetzender Körper, «Zeitschrift für physikalische Chemie», 12, 1—11 (1893). См. также «Naturwissenschaftliche Rundschau», 15, 66 (1900).

⁴⁶ «Inaugural-dissertation» (Breslau, 1899).

⁴⁷ A d o l f H e y d w e i l l e r, Über Gewichtsänderung bei chemischer und physikalischer Umsetzung, «Annalen der Physik», 5, 394—420 (1901).

⁴⁸ Ibid., S. 417: «Als sicher festgestellt kann man also die Gewichtsänderung betrachten: bei der Wirkung von Eisen auf Kupfersulfat in saurer oder basischer Lösung, bei der Auflösung von saurem Kupfersulfat und bei der Wirkung von Kaliumhydroxyd auf Kupfersulfat».

⁴⁹ F. S a n f o r d and L. R a y, «Physical Review», 5, 247 (1897); 7, 236 (1898).

⁵⁰ См. D. P e k a r, Das Gesetz der Proportionalität von Trägheit und Gravitation, «Naturwissenschaften» (7. Jahrgang, 1919), S. 327; См. также W. R o t h, ibid., S. 416.

В настоящее время, недостаточно чувствительна, чтобы обнаружить вес или массу, соответствующие теплоте реакции Q в химическом процессе⁵¹. В действительности только неточность инструментов и ошибки методов взвешивания были ответственны за подозрения, питаемые к закону Лавуазье на пороге нашего столетия. Однако следует заметить, что в результате этих исследований априорная необходимость закона Лавуазье давно уже стала проблематичной. Так, например, Вильгельм Оствальд в одной из своих лекций по натурфилософии, прочитанных в Лейпцигском университете в 1901 году, заявил, ссылаясь на закон Лавуазье:

«Имеет ли этот закон силу во всей своей строгости, этого нельзя решить а priori, и различные попытки представить его как логическую необходимость — чем занимался и такой пронизательный мыслитель, как Шопенгауэр, — сводятся к некоторого рода онтологическому доказательству. Ибо они покоятся на следующей аргументации. Под материей следует подразумевать неизменяющегося носителя различных изменяющихся свойств; следовательно, массе, представляющей основное свойство материи, должна быть присуща неизменяемость. Но так же можно доказать наперекор истине, что материя не может изменять своего пространства, так как наполнение пространства есть также основное свойство материи»⁵².

После такого исторического отступления вернемся теперь к нашему принципиальному вопросу. В свете того факта, что в теории относительности имеется только один закон сохранения массы или энергии («массэргии»), точный ответ на этот вопрос состоит в следующем: масса и энергия тождественны, это синонимы для одного и того же физического субстрата.*

Однако природа не всегда проявляет себя со всей строгостью теоретических построений. В обширной области физических процессов — за исключением ядерных явлений и процессов взаимодействия фундаментальных частиц — масса тела, поскольку она определяется при помощи процедуры взвешивания, и его энергия, поскольку она определяется при помощи совершённой работы

⁵¹ В экзотермической реакции $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + Q$, масса Q (117 кал) имеет порядок 10^{-12} г для реагирующей массы в 36 г.

⁵² См. В. Оствальд, Философия природы, СПб., 1903, стр. 203.

или через произведенную или поглощенную теплоту, сохраняются отдельно друг от друга. Природа обычно ведет себя таким образом, как если бы существовали два отдельных закона сохранения.

Были времена, когда состоятельный бизнесмен имел два отдельных банковских счета: долгосрочный счет, содержащий в себе большую часть богатства и не подвергающийся влиянию со стороны ежедневных коммерческих сделок, и краткосрочный счет, подвергающийся быстрым ежедневным изменениям. Подобным образом «массэргия» в подавляющем большинстве физических процессов при обычных условиях имеет два слоя, или два способа проявления — пассивный, или связанный способ, при котором она не принимает участия в том, что обычно называется «энергетическими превращениями», и активный способ, при котором она подвергается этим превращениям.

Так как преобладающая часть «массэргии» тела принадлежит пассивной компоненте и только ничтожно малая доля — активной, то недостаточная чувствительность процедур взвешивания позволяет говорить о сохранении массы. Равным образом калориметрические и другие подобные методы дают основание говорить о сохранении энергии в смысле дополнительности. Таким образом, с практической точки зрения сохранение дорелятивистского деления на массу и энергию остается до некоторой степени все еще справедливым.

Необходимо, однако, иметь в виду, что деление «массэргии» на пассивную компоненту (массу) и на активную компоненту (энергию) зависит от рассматриваемых обстоятельств. В обычных химических реакциях энергия внутренних электронных оболочек — в добавление к внутриядерной энергии — является частью пассивной компоненты, в то время как в процессах с высокой температурой (при полной ионизации атомов) она является частью активной компоненты. В ядерных реакциях, в которых происходит перегруппировка нуклонов, внутриядерная энергия становится частью активной компоненты, в то время как собственная масса нуклонов все еще образует запас пассивной компоненты. Наконец, в физике элементарных частиц деление на массу и энергию теряет свой смысл, так как частицы могут превращать свою

собственную массу в энергию либо полностью, либо частично.*

Дорелятивистское различие между массой и энергией как двух взаимно исключающих и существенно различных категорий существования, подобно многим другим понятиям, коренится также в психологико-биологической природе человеческого организма. Чувствительность человеческого организма к таким «энергетическим» воздействиям, как электромагнитное излучение (с помощью зрения) или акустические колебания (с помощью слуха), значительно более высока, чем его чувствительность к восприятиям массы, то есть его ответ на инерционные и гравитационные эффекты. Рассмотрим, например, чувствительность сетчатки человеческого глаза по отношению к энергии излучения. Было показано⁵³, что максимальная чувствительность глаза (при длине световой волны около 5100 Å) может быть обнаружена под действием примерно 5 квантов, энергия которых составляет около 10^{-11} эрг, в то время как тактильное восприятие инерционных или гравитационных эффектов, скажем весового давления в один грамм, может быть обнаружено при энергии около 10^{21} эрг (1 грамм = c^2 эрг). Сенсорные аппараты человека оказываются в 10^{32} раз более чувствительными к энергетическим восприятиям, чем к восприятиям эффектов, связанных с массой**.

Если бы это отношение было порядка единицы, а не 10^{32} , то тождественность массы и энергии была бы очевидным фактом опыта. Человеческий глаз, воспринимающий свет от солнца, ощущал бы в этом случае и удары фотонов. Ассоциация во времени и пространстве привела бы, таким образом, человеческий разум к воззрению на массу и энергию как на различные аспекты одной и той же физической сущности⁵⁴.

В заключение этой главы можно поставить вопрос: почему в обычных физико-химических процессах значительная часть «массэргии» тела остается скрытой и неак-

⁵³ S. Hecht, S. Shlär and M. H. Pirenne, Energy, quanta, and vision, «Journal of General Physiology», 25, 819 (1942).

⁵⁴ Friedrich Dessauer, Kleine Notiz über den menschlichen Standort gegenüber dem Materie-Energieproblem, «Helvetica Physica Acta», 15, 108—110 (1942).

тивной и только бесконечно малое ее количество принимает участие в энергетических превращениях? Почему физический субстрат не ведет себя всегда так, как это имеет место в физике элементарных частиц? Ответ на этот вопрос лежит за пределами теории относительности. Его следует искать в квантово-механических аспектах динамики атома, в существовании стационарных состояний и дискретных энергетических уровней. В этом основная причина того, что классическое понятие массы еще сохраняется в качестве пережитка. Это есть *phenomenon bene fundatum* (прочно укоренившееся явление), как однажды Лейбниц охарактеризовал массу.