

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

Формула Эйнштейна: $E_0 = mc^2$. "Не смеётся ли Господь Бог"?

Л.Б. Окунь

Прослежены формулировки соотношения между энергией и массой в трудах Эйнштейна с 1905 по 1955 год. Эйнштейн неоднократно подчеркивал, что масса тела m эквивалентна его энергии покоя E_0 . Но часто использовал и менее четкую формулировку об эквивалентности энергии и массы. В результате и сегодня формула Эйнштейна $E_0 = mc^2$ гораздо менее известна, чем ее популярная форма $E = mc^2$, в которой E — полная энергия, равная сумме энергии покоя и кинетической энергии свободно движущегося тела. Одним из последствий этого является широко распространенное заблуждение, что масса тела возрастает с его скоростью и что это даже является экспериментальным фактом. Как писал драматург А.Н. Островский: "Надо же, чтобы было для людей что-нибудь строгое, высокое, священное, чего профанировать нельзя".

PACS numbers: 01.65. + g, 03.30. + p

DOI: 10.3367/UFNr.0178.200805g.0541

Содержание

1. Введение (541).
 2. Пролог. Годы 1881 – 1904 (542).
 3. Замечательный 1905 год (542).
 4. "Не водит ли он меня за нос?" (543).
 5. Годы 1906 – 1910. Минковский (543).
 6. Годы 1911 – 1915. На пути к общей теории относительности (544).
 7. 1917 год. Космологическая константа (545).
 8. Годы 1918 – 1920. Нётер (545).
 9. 1921 год. "Сущность теории относительности" (546).
 10. Годы 1927 – 1935 (546).
 11. Годы 1938 – 1948. Атомная бомба (547).
 12. 1949 год. Диаграммы Фейнмана (549).
 13. Последние годы 1952 – 1955 (550).
 14. Борн, Ландау, Фейнман (550).
 15. Эпилог (551).
 16. Заключение (551).
- Постскриптум. Памяти Дж.А. Уилера (552).
Список литературы (552).

1. Введение

Формула $E = mc^2$ является, пожалуй, самой знаменитой формулой в мире. В сознании сотен миллионов людей

она связана с устрашающим атомным оружием. В сознании миллионов она является символом теории относительности. Многочисленные популяризаторы науки убеждают своих читателей, слушателей и зрителей в том, что в согласии с этой формулой масса любого тела (любой частицы) возрастает с увеличением его скорости. И только немногие физики — специалисты в области физики элементарных частиц — знают, что истинная формула Эйнштейна — это $E_0 = mc^2$, где E_0 — энергия, содержащаяся в покоящемся теле, и что масса тела не зависит от скорости, с которой оно движется и, следовательно, не зависит от его кинетической энергии.

Большинство физиков, знакомых со специальной теорией относительности, знают, что в ней энергия E и импульс \mathbf{p} свободно движущегося тела связаны соотношением $E^2 - \mathbf{p}^2 c^2 = m^2 c^4$, где m — масса тела. Однако не все они осознают, что эта формула несовместима с $E = mc^2$. Еще меньшее число знает, что она абсолютно совместима с $E_0 = mc^2$, поскольку E_0 — это значение E при $\mathbf{p} = 0$. Данная статья написана для тех, кто хотел бы не заблудиться в "трех соснах" этих трех формул и хотел бы лучше понимать теорию относительности и ее историю.

Когда в 1905 г. Эйнштейн впервые ввел понятие энергии покоя и обнаружил, что масса тела есть мера содержащейся в нем энергии, это так поразило его, что он написал своему другу: "...не смеется ли над этим Господь Бог и не водит ли он меня за нос". Ниже мы проследим, как на протяжении всей последующей жизни Эйнштейн многократно возвращался к этому вопросу.

Мы увидим, как формула $E_0 = mc^2$ прокладывала свой путь в трудах Эйнштейна. Как он тщательно подчеркивал, что масса тела зависит от содержащейся в нем энергии, но никогда не утверждал (в отличие от своих популяризаторов!), что она зависит от его скорости. И тем не менее он ни разу не отмежевался от приписывае-

Л.Б. Окунь. Государственный научный центр Российской Федерации "Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова"
ул. Б. Черемушкинская 25, 117218 Москва, Российская Федерация
Тел. (495) 123-31-92, (495) 125-96-60
E-mail: okun@itep.ru

Статья поступила 21 декабря 2007 г.,
после доработки 20 марта 2008 г.

мой ему формулы $E = mc^2$, ставшей иконой современной физики в массовом сознании.

Если Вы почувствуете, что Вам неинтересно следить за дотошным анализом и сопоставлением текстов, то загляните в конец этой статьи, где сделана попытка кратко описать результаты анализа без излишних технических деталей. Возможно, что после этого подробности неоднократных попыток Эйнштейна прояснить связь между энергией и массой станут Вам более интересны.

При написании этой статьи я пользовался первым в мировой литературе *Собранием научных трудов* Эйнштейна [1]. (Это четырехтомное издание вышло на русском языке в 1965–1967 гг.) Там, где это было возможно, я пользовался также многотомным Принстонским собранием [2, 3]. (С 1987 г. в Принстоне стали выходить тома "всех бумаг" Эйнштейна [2] и их переводы на английский язык [3]. К 2007 г. вышло десять томов, пять из которых (1, 5, 8, 9, 10) содержат переписку до 1920 г. и пять (2, 3, 4, 6, 7) — труды до 1921 г.)

2. Пролог. Годы 1881–1904

Хорошо известно, что принцип относительности восходит к Галилею [4] и Ньютону [5], а теория относительности построена в трудах Лоренца, Пуанкаре, Эйнштейна и Минковского [6].

Представление о массе, зависящей от скорости, возникло в годы, предшествовавшие созданию теории относительности, и в первые годы ее существования. Оно формировалось в статьях Томсона [7], Хевисайда [8], Сирла [9], Абрагама [10], а также Лоренца [11] и Пуанкаре [12], пытавшихся согласовать уравнения электромагнетизма Максвелла с уравнениями механики Ньютона.

Эти работы стимулировали эксперименты Кауфманна [13] и Бухерера [14, 15]. Обработывая свои экспериментальные данные с помощью формул нерелятивистской механики Ньютона, они заключили, что масса возрастает с увеличением скорости.

И дело было не только в формулах, но и самом духе, можно сказать, в самой основе нерелятивистской физики, в которой масса есть мера инерции тела. На стыке XIX и XX вв. было еще очень трудно осознать, что эта основа заменяется более общей основой: мерой инерции тела является не его масса, а его полная энергия E , равная сумме энергии покоя и кинетической энергии. А то обстоятельство, что она при этом входит с множителем $1/c^2$ подталкивало к тому, чтобы называть E/c^2 массой. Но последующее развитие теории относительности, в основном связанное с именами Эйнштейна, Минковского и Нётер, показало, что понятие массы следует связывать не с полной энергией, а только с энергией покоя.

3. Замечательный 1905 год

В 1905 г. Эйнштейн опубликовал три основополагающие статьи [16–18], относящиеся к свойствам света и вещества. В [16] он ввел понятие кванта энергии света и с помощью этого понятия объяснил закономерности фотоэффекта, открытые на опыте незадолго до этого. (Величина константы Планка h — кванта действия — была известна ранее, см. [19].)

В [17] Эйнштейн рассмотрел почти всю совокупность следствий принципа относительности и конечности скорости света. В частности, в § 8 он получил формулу

преобразования энергии света при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой, движущейся относительно первой со скоростью v :

$$\frac{E'}{E} = \frac{1 - (v/V) \cos \phi}{\sqrt{1 - (v/V)^2}}.$$

Здесь V — скорость света, ϕ — угол между направлениями движения света и наблюдателя. А в § 10 он получил выражение для кинетической энергии электрона:

$$W = \mu V^2 \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - (v/V)^2}} - 1 \right\},$$

где μ — масса электрона, а v — его скорость.

(Кроме того, в § 10 Эйнштейн вывел выражения для так называемых продольной m_l и поперечной m_t масс электрона, введенных ранее Абрагамом и Лоренцем, получив

$$m_l = \frac{\mu}{\left(\sqrt{1 - (v/V)^2}\right)^3},$$

$$m_t = \frac{\mu}{1 - (v/V)^2}.$$

Последнее выражение, отличающееся от m_t Лоренца, — неправильное, и Эйнштейн в дальнейшем на нем не настаивал.)

Что касается формул для кинетической энергии электрона W и энергии фотона E' , то обе эти формулы Эйнштейн применил в следующей статье [18] при установлении связи между массой и энергией.

В этой статье Эйнштейн рассмотрел испускание покоящимся массивным телом двух "количеств света", летящих с равными энергиями $L/2$ в противоположных направлениях. В этой же статье он впервые ввел энергию покоя массивного тела, обозначив ее до излучения как E_0 , а после — как E_1 . В силу закона сохранения энергии

$$E_0 - E_1 = L.$$

Затем Эйнштейн рассмотрел тот же процесс в системе отсчета, движущейся относительно тела со скоростью v , и получил для разности кинетических энергий тела до и после излучения

$$K_0 - K_1 = L \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - (v/V)^2}} - 1 \right\}.$$

При этом он специально оговорил, что из разности кинетических энергий выпадает произвольная аддитивная постоянная C , входящая в выражение для энергии. В течение последующих пятидесяти лет он неоднократно возвращался к вопросу о постоянной C , и мы еще обсудим это.

Зависимость от v левой и правой частей равенства одинакова в силу выражения для W . Поскольку скорость v до и после излучения одна и та же, а кинетическая энергия тела уменьшилась, то отсюда непосредственно следует, что масса тела уменьшилась на величину L/V^2 . Отсюда Эйнштейн сделал вывод: "Масса тела есть мера содержащейся в нем энергии", и заметил, что это, возможно, удастся проверить в распаде радия.

Обращает на себя внимание и заглавие статьи: "Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии?".

В сочетании с ее содержанием оно указывает на то, что Эйнштейн считал именно массу тела мерой его инерции. А это справедливо лишь в ньютоновском приближении. В теории же относительности, как мы знаем сегодня, мерой инерции тела является его полная энергия E : чем больше полная энергия тела, тем больше его инерция. (Под мерой инерции здесь я имею в виду коэффициент пропорциональности между импульсом и скоростью. Единого коэффициента пропорциональности между силой и ускорением в теории относительности нет. Это установили еще Абрагам и Лоренц, когда ввели продольную и поперечную массы.)

Эйнштейн считал, что энергия свободного тела в теории относительности определена лишь с точностью до аддитивной постоянной, подобно потенциальной энергии в ньютоновской механике. Это, по-видимому, привело его к недооценке собственного революционного шага — введения в физику понятия энергии покоя. Дескать, ничего особенного нет в том, что есть энергия покоя E_0 , если энергия определена с точностью до C .

Но, как мы знаем сегодня, в созданной им теории нет места для C . В теории относительности энергия и импульс свободной частицы определены абсолютно однозначно соотношением $E^2 - \mathbf{p}^2 c^2 = m^2 c^4$, к которому мы еще не раз вернемся.

4. "Не водит ли он меня за нос?"

Открытие, что масса зависит от энергии, так поразило Эйнштейна, что он пишет своему другу Конраду Габихту: "Еще мне пришло в голову одно следствие, вытекающее из электродинамического исследования. Принцип относительности в связи с основными максвелловскими уравнениями требует, в частности, чтобы масса была непосредственной мерой энергии тела. Свет переносит массу. Заметное уменьшение массы должно происходить у радия. Мысль забавная и заманчивая. Не знаю только, не смеется ли надо мной Господь Бог, не водит ли он меня за нос" [20]. (Несколько иной, но близкий по смыслу перевод можно найти в книге [21].)

Похоже, что Бог продолжает водить за нос истолкователей теории относительности до сих пор.

5. Годы 1906–1910. Минковский

1906 г.

Эйнштейн опубликовал в 1906 г. две статьи по теории относительности — [22, 23]. В [22] он рассмотрел перенос массы светом внутри полого цилиндра от одного торца к другому. Чтобы цилиндр как целое не сдвинулся, он потребовал, чтобы свет с энергией E обладал массой E/V^2 , воспроизведя тем самым результат Пуанкаре [12] 1900 г. Видимо, он считал недопустимым, чтобы переносчик энергии и массы сам не имел массы, был безмассов. В [23] он рассмотрел метод определения отношения продольной и поперечной масс электрона, которые ранее ввели Лоренц и Абрагам. Таким образом, эти статьи по сравнению с [18] представляли собой шаг назад в вопросе о массе.

1907 г.

В 1907 г. Эйнштейн опубликовал четыре статьи по теории относительности: [24–27]. В первой из них обсуждалась

частота излучения атома. Во второй подчеркивалось различие между принципом относительности и теорией относительности. Свои работы он считал относящимися к принципу относительности, подобному принципам термодинамики. Что касается теории относительности, то он полагал, что эту теорию еще предстоит построить.

Для обсуждаемого нами вопроса особенно важна статья [26], в которой был сформулирован принцип эквивалентности массы и энергии (сноска в §4): "Следует отметить, что упрощающее предположение $\mu V^2 = \varepsilon_0$ является одновременно выражением принципа эквивалентности массы и энергии..." Упрощающее предположение, о котором здесь идет речь, — это выбор произвольной постоянной в выражении для энергии.

Самая подробная статья из опубликованных в 1907 г. — [27]. Она состоит из пяти частей: 1. Кинематическая часть (§§ 1–6); 2. Электродинамическая часть (§ 7); 3. Механика материальной точки (электрона) (§§ 8–10); 4. К механике и термодинамике систем (§§ 11–16); 5. Принцип относительности и тяготение (§§ 17–20). Со статьей [27] непосредственно связана заметка [28], содержащая исправления опечаток и уточнения.

Особый интерес для нас представляют части 4 и 5. В части 4 обсуждается аддитивная постоянная в энергии и показывается, что она не входит в соотношение между импульсом, энергией и скоростью тела. Часть 5 заключается словами: "Таким образом, выведенная в §11 теорема о том, что энергии E соответствует масса величиной E/c^2 , выполняется не только для инертной, но и для тяготеющей массы, если остается в силе предположение, введенное в §17". С одной стороны, в этой фразе утверждается, что как мерой инерции, так и источником гравитации является именно энергия, а не масса. А с другой стороны, ее можно понять и так, что фотон с энергией E имеет инертную и гравитационную массы, равные E/c^2 . Эта неоднозначность интерпретации до сих пор порождает ожесточенные споры.

1908 г.

В 1908 г. Эйнштейн совместно с И. Лаубом опубликовал две статьи по электродинамике движущихся макроскопических тел — [29, 30] (см. также [31, 32]). Хотя эти статьи имеют отношение к теории относительности, тем не менее обсуждаемой нами проблемы о соотношении между энергией и массой они не затрагивают.

Важнейшей вехой в развитии теории относительности стал доклад Германа Минковского [33], сделанный в 1908 г. (см. также [6, с. 181]). В нем впервые была предложена четырехмерная пространственно-временная формулировка теории относительности. Как известно, в этой формулировке масса частицы является величиной, не зависящей от ее скорости.

Как ни парадоксально, тогда же появилась первая работа Льюиса [34], в которой массой была объявлена величина E/c^2 . Дальнейшее развитие и пропаганду эта точка зрения получила в статьях Льюиса и Толмена [35–38].

1909 г.

Статья Эйнштейна [39], опубликованная в 1909 г., не касалась вопроса о массе и энергии. Но в статьях [40–42], опубликованных тогда же, содержатся высказывания, проливающие яркий свет на его взгляды по этому вопросу. Так, в статье [42], содержащей текст его первого

публичного выступления (на съезде немецких естествоиспытателей в Зальцбурге), Эйнштейн пишет:

«В вышедшем в 1902 году превосходном учебнике¹ физики Хвольсона, во Введении об эфире говорится: "Вероятность гипотезы о существовании этого агента почти граничит с достоверностью". Но сегодня гипотезу эфира мы должны считать уже устаревшей». И далее: "... инертная масса тела при испускании света уменьшается... Энергия и масса оказываются такими же эквивалентными величинами, как теплота и механическая энергия... теория относительности изменяет наши взгляды на природу света в том отношении, что свет выступает в ней не в связи с гипотетической средой, но как нечто существующее самостоятельно, подобное веществу".

1910 г.

В 1910 г. в статьях [43, 44] Эйнштейн и Хопф обсуждали применение теории вероятностей при рассмотрении свойств излучения.

Тогда же Эйнштейн опубликовал во французском журнале большой обзор по теории относительности [45], посвященный в основном преобразованиям пространственных координат и времени с кратким изложением идей Минковского о четырехмерном мире. Только в самом конце статьи он коснулся того, что "масса любого тела зависит от содержащейся в нем энергии... К сожалению, изменения массы W/c^2 настолько малы, что в настоящее время нет никакой надежды обнаружить их экспериментальным путем".

То, что под содержащейся в теле энергией W он понимает энергию покоя, Эйнштейн не оговаривает.

6. Годы 1911–1915.

На пути к общей теории относительности

1911 г.

В 1911 г. Эйнштейн опубликовал три статьи по теории относительности: [46–48].

В [46] он обсудил распространение света в гравитационном поле, исходя из того, что фотон с энергией E имеет инертную и тяжелую массы, равные E/c^2 , и получил угол отклонения света в поле Солнца, равный 0,83 дуговой секунды, что в два раза меньше правильного значения, которое он выведет на основе общей теории относительности в 1915 г.

(Отмечу, что это же "половинное значение" получил Зольднер еще в 1804 г. (см. [49, 50]), но Эйнштейн об этом не знал, так как статья Зольднера была прочно забыта вскоре после ее публикации.)

В конце обзорного доклада [47], в основном посвященного часам и линейкам в теории относительности, Эйнштейн говорит об объединении закона сохранения массы с законом сохранения энергии: "Каким бы странным ни казался этот результат, следует указать, что в некоторых частных случаях данные, известные из опыта, и без теории относительности позволяют с уверенностью заключить, что инертная масса увеличивается с ростом энергии". Возможно, что при этом он

имел в виду опыты Кауфманна и Бухерера. Но тогда можно было бы думать, что он считал, что масса возрастает с увеличением и кинетической энергии и, следовательно, скорости.

В заметке [49] обсуждается сокращение длины движущегося стержня.

1912 г.

Работы Эйнштейна в этот период [51–55] в основном представляют собой попытки создать общую теорию относительности, включающую гравитацию. Специальной теории относительности посвящены только лекции [51].

В высказываниях Эйнштейна, относящихся к 1912 г., опять можно проследить отмеченную выше двойственность интерпретации массы, с одной стороны, как эквивалента энергии покоя и, с другой, — как меры инерции.

В них содержится утверждение, что m следует рассматривать как характеристическую константу массивной точки, которая не меняется при движении. Вместе с тем говорится, что энергия свободной частицы определена с точностью до произвольной аддитивной константы. И тем не менее mc^2 равно энергии покоя (см. обсуждение уравнения (28') в [51]).

1913–1914 гг.

В большой статье [56], опубликованной в 1913 г. совместно с М. Гроссманом, Эйнштейн продолжает обсуждать пропорциональность инертной и тяжелой масс, с чрезвычайно высокой точностью выявленную в опытах Этвеша, и рассматривает зависимость скорости света c от гравитационного потенциала.

В 1914 г. Эйнштейн опубликовал заметку [57], в которой нашли отражение его взгляды на понятие массы. К тому же времени относится и рукопись конспекта его лекций по специальной теории относительности [58].

В [57] он обсуждает вклад гравитационного поля в тяжелую массу и инертную массу тела и приходит к выводу, что инерция замкнутой системы полностью определяется ее энергией покоя.

В [58] приведены выражение 4-вектора энергии-импульса и соотношение $E_0/c^2 = m$, которые следующий раз появятся в работах Эйнштейна лишь в 1921 г. Заметим, что в [58] m называется массой покоя (Ruhemasse), что как бы подразумевает, что массы тела в покое и при движении различны.

1915 г.

1915 год ознаменовался завершением создания общей теории относительности в статье [59]. Но уже в предыдущей статье [60] Эйнштейн получил формулы, описывающие два важнейших эффекта этой теории: прецессию перигелия Меркурия и отклонение света гравитационным полем Солнца. Вековое движение перигелия Меркурия (около 40" в столетие), которое нельзя было объяснить влиянием известных тел Солнечной системы, было установлено в 1859 г. Леверье. Эйнштейн вычислил, что общая теория относительности дает 43".

Но поистине всемирно известным стало предсказание угла отклонения света 1,7" после того, как оно было подтверждено британской экспедицией, наблюдавшей Солнечное затмение в 1919 г.

¹ В 1902 г. был опубликован немецкий перевод *Курса физики* О.Д. Хвольсона (1-й и 2-й том), изданного в России в 1897 г.

7. 1917 год. Космологическая константа

1917 г.

В 1917 г. вышла популярная книжка [61]. В основном в ней рассказывается о совместном преобразовании пространственных и временных координат. Но в § 15 говорится о кинетической энергии материальной точки, которая равна теперь не $mv^2/2$, а $mc^2/\sqrt{1-v^2/c^2}$ и, следовательно, включает в себя как собственно кинетическую энергию, так и энергию покоя. Далее говорится: "Дорелятивистская физика знала два фундаментальных закона сохранения, а именно: закон сохранения энергии и закон сохранения массы; оба этих фундаментальных закона считались совершенно независимыми друг от друга. Теория относительности слила их в один". И хотя из дальнейшего текста внимательный читатель может заключить, что речь идет о $E_0 = mc^2$, чуть менее внимательный читатель может сделать вывод, что речь идет о $E = mc^2$. То обстоятельство, что временами Эйнштейн включал энергию покоя в понятие кинетической энергии, не способствовало установлению ясности.

Самая знаменитая статья Эйнштейна из вышедших в 1917 г. — это "Вопросы космологии и общая теория относительности" [62]. В ней он впервые поставил вопрос о возможной ненулевой плотности энергии вакуума, которую он обозначил буквой λ . Эта плотность энергии одинакова во всех точках Вселенной. По существу она представляет собой полностью делокализованную энергию, разлитую по всей Вселенной.

Эйнштейн ввел эту космологическую константу, называемую λ -членом для того, чтобы описать в общей теории относительности стационарную Вселенную. Но вскоре выяснилось, что достичь устойчивой стационарности на этом пути нельзя.

В 1922 г., изучая именно эту работу Эйнштейна, Фридман выдвинул теорию расширяющейся Вселенной [63, 64]. Эйнштейн сначала посчитал, что Фридман ошибся [65], но потом согласился с ним [66]. В 1929 г. Хаббл представил первые наблюдательные данные [67] в пользу расширения Вселенной.

В 1945 г. Эйнштейн опубликовал второе издание работы "Сущность теории относительности" со специальным дополнением "О космологической проблеме", посвященным теории расширяющейся Вселенной [68].

На грани 1970–1980-х годов возникла [69–71] модель экспоненциально быстрого раздувания (инфляции) ранней Вселенной. Согласно этой модели эффективный космологический член создается в момент образования Вселенной ненулевым вакуумным средним особого скалярного поля, впоследствии превращающегося в энергичные частицы.

В 1998–1999 гг. две группы, измерявшие яркости и спектры сверхновых звезд, пришли к выводу, что темп расширения Вселенной ускоряется [72, 73] (см. также [74]). Все данные указывают на то, что в обычной материи заключено всего 4 % энергии во Вселенной, около 24 % представлено частицами так называемой темной материи, природа которых пока неизвестна, и приблизительно 70 % всей энергии Вселенной существует в виде космологической постоянной. Ее стали называть темной энергией. Так возродилась идея эйнштейновского λ -члена.

8. Годы 1918–1920. Нётер

1918 г.

В 1918 г. вышла из печати замечательная работа Эмми Нётер [75], в которой, в частности, было доказано, что динамические законы сохранения следуют из свойств симметрии пространства-времени. Мы знаем, что сохранение энергии является следствием однородности времени, а сохранение импульса — следствием однородности пространства. Сохранение момента импульса (углового момента) следует из изотропии пространства: физика не меняется при вращениях координатных осей в плоскостях xy , yz , zx . Аналогично, лоренц-инвариантность есть следствие того, что физика не меняется при псевдоевклидовых вращениях в плоскостях xt , yt , zt .

В письме Гильберту Эйнштейн отметил это открытие Нётер [76]: "Вчера я получил очень интересную статью госпожи Нётер о построении инвариантов. На меня производит впечатление то, что такие вещи можно рассматривать со столь общей точки зрения. Старой гвардии в Гёттингене не повредило бы, если бы ее послали на обучение к госпоже Нётер. Похоже, что она хорошо понимает свое ремесло".

Вскоре Эйнштейн направил в печать статью [77] о сохранении энергии в общей теории относительности, в которой, в частности, утверждал, что энергия замкнутой системы играет роль как инертной, так и тяжелой массы.

1919 г.

Из публикаций 1919 г. следует отметить краткое сообщение "Проверка общей теории относительности" [78] об открытии отклонения луча света притяжением Солнца и статью в газете *Times* "Что такое теория относительности?" [79]. В ней Эйнштейн написал, в частности: "Наиболее важный результат специальной теории относительности касался инертной массы материальной системы. Оказалось, что инертная масса системы должна зависеть от содержащейся в ней энергии; это привело к представлению о том, что инертная масса является не чем иным, как скрытой энергией. Закон сохранения массы потерял свою независимость и слился с законом сохранения энергии".

1920 г.

К 1920 г. относится черновая рукопись большой популярной статьи "Фундаментальные идеи и методы теории относительности, представленные в их развитии" [80], над которой Эйнштейн работал по заказу журнала *Nature* и которую так и не опубликовал.

Тогда же в берлинской газете появилось письмо Эйнштейна "Мой ответ" [81]. Письмо начинается словами: «Под претенциозным названием "Рабочее объединение немецких естествоиспытателей" собралось пестрое общество, ближайшая цель которого заключается в том, чтобы развенчать теорию относительности в глазах нефизиков, а вместе с ней и меня как ее основателя».

Далее Эйнштейн пишет: "...у меня есть все основания считать, что в основе этой затеи лежит отнюдь не стремление к истине... Отвечаю я только потому, что мои друзья не раз просили меня высказать свою точку зрения.

Прежде всего замечу, что, насколько мне известно, сегодня вряд ли можно найти ученого из тех, кто внес заметный вклад в теоретическую физику, который не признавал бы, что теория относительности является логически вполне замкнутой и что она согласуется со всеми твердо установленными данными опыта. Наиболее выдающиеся физики-теоретики — я назову Г.А. Лоренца, А. Зоммерфельда, М. Лауэ, М. Борна, Дж. Лармора, А. Эддингтона, П. Дебая, П. Ланжевена, Т. Леви-Чивиту — стоят на почве теории относительности и сами активно работают над ней...

Меня упрекают в том, что я занимаюсь пошлой рекламой теории относительности. Могу лишь заявить, что всю жизнь я любил хорошо обдуманые, трезвые фразы и лаконичный стиль".

9. 1921 год.

"Сущность теории относительности"

В 1921 г. Эйнштейн был приглашен в Принстон и прочел там лекции, составившие книгу *Сущность теории относительности* [82]. В этой книге он впервые максимально публично и однозначно описал, что он понимает под эквивалентностью энергии и массы. В уравнениях (41)–(43) он привел выражения для компонент 4-вектора энергии-импульса тела через его массу и скорость. В уравнении (44) привел выражение энергии тела в состоянии покоя через его массу: $E_0 = mc^2$. В уравнении (45) привел выражение для энергии при малой скорости q : $E = m + mq^2/2 + 3mq^4/8 + \dots$ (в единицах, в которых $c = 1$). В тексте между уравнениями (44) и (45) он пишет: "Таким образом, масса и энергия сходны по существу — это только различные выражения одного и того же. Масса тела не постоянна; она меняется вместе с его энергией". Затем следует примечание о том, что выделение энергии в радиоактивных распадах обусловлено "эквивалентностью между массой покоя и энергией покоя". При радиоактивном распаде сумма получающихся масс всегда меньше, чем масса распадающегося ядра. Разность проявляется как в виде кинетической энергии порожденных частиц, так и в виде высвобожденной энергии излучения".

В этих высказываниях заслуживают быть отмеченными три обстоятельства. Во-первых, при четком определении в уравнениях массы как величины, не зависящей от скорости, использование для нее термина "масса покоя", подразумевающего, что масса зависит от скорости. Во-вторых, отсутствие явного утверждения, что масса изменяется с изменением энергии тела, но не его скорости. В-третьих, утверждение, что масса и энергия — "это только различные выражения одного и того же", в то время как масса — это релятивистский инвариант, т.е. четырехмерный скаляр, а энергия — четвертая компонента четырехмерного импульса. Возможно, именно из-за этих, не вполне точных, слов, сопровождающих вполне четкие формулы, многие читатели до сих пор не видят в [82] четкого высказывания в пользу $E_0 = mc^2$ против $E = mc^2$.

Заслуживает упоминания маленькая популярная брошюра *Теория относительности* [83], автор которой И. Леман благодарит Эйнштейна за ценные указания. Леман восхищается глубиной и изяществом мыслей Минковского и подчеркивает огромность запасов энергии, существующих в форме массы.

10. Годы 1927–1935

1927 г.

В 1927 г. в мире прошли конференции, посвященные двухсотлетию со времени кончины Ньютона. Эйнштейн откликнулся рядом статей. В [84] он писал: "Учение Ньютона не давало никакого объяснения тому в высшей степени замечательному факту, что вес и инерция тела определяются одной и той же величиной (массой). Примечательность этого факта поразила самого Ньютона".

К 1927 г. в первую очередь благодаря трудам Эйнштейна, стало ясно, что инерция и вес движущегося тела определяются не его массой, а соответственно его энергией E и величиной $p_\mu p_\nu / E$, где p_μ — вектор энергии-импульса. В ньютоновском пределе обе они сводятся к энергии покоя, т.е. к массе. Таково простое объяснение равенства инертной и тяжелой масс в механике Ньютона, которое дает теория относительности.

Но Эйнштейн, как мы видим, продолжал пользоваться старой нерелятивистской терминологией.

1928 г.

В статье "Фундаментальные понятия физики и изменения, которые произошли в них за последнее время" [85] Эйнштейн сформулировал свое отношение к проблеме причинности в квантовой механике:

"Таким образом, теория поля поколебала фундаментальные понятия времени, пространства и материи. Однако одна опора здания оставалась неизменной: гипотеза причинности. Законы природы таковы, что из состояния мира в некоторый момент времени однозначно следуют все другие его состояния как в прошлом, так и в будущем.

Однако в настоящее время возникли серьезные сомнения относительно понимаемого таким образом принципа причинности. Эти сомнения обусловлены не погоней ученых за новыми сенсациями. Толчком, побудившим к ним, явились факты, кажущиеся противоречащими теории строгой причинности. По-видимому, поле, рассматриваемое как физическая реальность в последней инстанции, не позволяет должным образом объяснить отдельные факты, связанные с излучением и строением атома. Именно здесь мы сталкиваемся с проблемами такой сложности, что для преодоления их требуется чудовищное напряжение интеллектуальной мощи современного поколения физиков".

Эта проблема была решена по существу через 20 лет в двух статьях Фейнмана по квантовой электродинамике (см. ниже), но когда это произошло, Эйнштейн не заметил этого. По-видимому, потому что считал, что вся квантовая физика нарушает причинность.

1929 г.

В статье в Британской энциклопедии [86] Эйнштейн описал 4-мерное пространство-время, не упомянув Минковского и совершенно обойдя молчанием 4-мерное пространство энергии-импульса.

В речи на торжественном заседании, посвященном 50-летию защиты докторской диссертации Планком, на котором Эйнштейну была вручена медаль Планка, он снова вернулся к проблеме причинности в квантовой механике: "Хотя я глубоко убежден в том, что мы не остановимся на уровне субпричинности, а придем в

конце концов к сверхпричинности в том смысле, о котором говорилось выше, я восхищаюсь работами физиков молодого поколения, объединенными под названием квантовая механика, и верю в правильность этой теории. Я только считаю, что ограничения, приводящие к *статистическому* характеру ее законов, должны быть со временем устранены" [87].

1934–1935 гг.

29 декабря 1934 г. газета *Питтсбург пост-газетт* опубликовала интервью с Эйнштейном под заголовком "Надежда на атомную энергию отвергается Эйнштейном" [88].

В декабре 1934 г. Эйнштейн прочел лекцию "Элементарный вывод эквивалентности массы и энергии" на совместном заседании Американского математического общества, Американского физического общества и Американского общества развития науки. Эта лекция была опубликована в 1935 г. в Бюллетене Американского математического общества [89].

Эйнштейн ставит перед собой задачу — доказать эквивалентность массы и энергии, основываясь только на трех предположениях: "помимо преобразований Лоренца, лишь на законах сохранения энергии и импульса". На первых страницах он вводит 4-вектор скорости и, умножая его на массу m , получает 4-вектор, пространственные компоненты которого, — полагает он, — естественно считать импульсом, а временную — энергией" и, таким образом, приписать покоящейся частице *энергию покоя* $m(mc^2$ в обычных единицах)".

"Но, — говорит он, — ниоткуда не следует, что... именно этот импульс удовлетворяет закону сохранения импульса, а эта энергия — закону сохранения энергии... Кроме того, не так уж ясно, что следует понимать под *энергией покоя*, так как энергия определена лишь с точностью до неопределенной аддитивной постоянной..." — и продолжает:

"Сейчас мы покажем, что если законы сохранения энергии и импульса справедливы во всех системах координат, связанных друг с другом преобразованиями Лоренца, то энергия и импульс действительно определяются приведенными выше формулами и предполагаемая эквивалентность массы и энергии покоя также существует".

И Эйнштейн приступает к доказательству того, что законы сохранения действительно выполняются для рассматриваемого им 4-импульса. Для этого он рассматривает энергии и импульсы двух частиц до и после их соударения в различных лоренцевых системах координат и приходит к выводу: "Таким образом, энергия покоя при неупругом соударении изменяется аддитивно, так же как масса. Что касается энергии покоя, то она определяется, как это следует из самого понятия энергии, лишь с точностью до аддитивной постоянной, и мы можем наложить условие, чтобы E_0 обращалось в нуль вместе с m . При этом $E_0 = m$, что и является доказательством принципа эквивалентности инертной массы и энергии покоя".

Обращает на себя внимание то, что Эйнштейн в этой лекции ни разу не упоминает о теореме Нётер [75], согласно которой сохранение 4-импульса и лоренц-инвариантность обусловлены свойствами симметрии пространства-времени Минковского. Он предпочитает выводить свойства 4-импульса, рассматривая парные соударения в трехмерном пространстве и отдельно

предполагая лоренц-инвариантность и сохранение энергии и импульса.

4 мая 1935 г. он публикует в *Нью-Йорк Таймс* некролог "Памяти Эмми Нётер" [90], в котором очень высоко отзывается о ее заслугах перед математикой и обходит молчанием теорему, которая так важна в физике. Последовательное изложение законов сохранения на основе свойств симметрии пространства-времени в духе Нётер было дано впервые в 1941 г. в *Теории поля* Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица (см. ниже).

В 1935 г. была также опубликована знаменитая статья [91], написанная Эйнштейном совместно с Н. Розеном и Б. Подольским, об интерпретации измерения в квантовой механике.

11. Годы 1938–1948. Атомная бомба

1938 г.

В 1938 г. выходит знаменитая научно-популярная книга Эйнштейна и его молодого сотрудника Леопольда Инфельда *Эволюция физики* [92]. В ней авторы неоднократно возвращаются к вопросу о массе. Сначала в главе I "Расцвет механистического воззрения", в разделе "Еще одна нить" они вводят понятия инертной и тяжелой массы и говорят об их равенстве как о путевой нити к общей теории относительности. В главе III "Поле и относительность", в разделе "Относительность и механика" они вводят понятие массы покоя: "Покоящееся тело имеет определенную массу, так называемую *массу покоя*". Далее они пишут: "...излучение, испускаемое Солнцем и проходящее через пространство, содержит энергию и поэтому имеет массу". И еще: "Согласно теории относительности, нет существенного различия между массой и энергией. Энергия имеет массу, а масса представляет собой энергию. Вместо двух законов сохранения мы имеем только один: закон сохранения массы-энергии. Этот новый взгляд оказался очень плодотворным в дальнейшем развитии физики". Кажется, что это утверждение является адекватным словесным выражением формулы $E = mc^2$ и не согласуется с формулой $E_0 = mc^2$.

В той же главе III, в разделе "Общая теория относительности и ее экспериментальная проверка", рассказывается о том, что эллиптическая орбита Меркурия прецессирует, совершая полный оборот вокруг Солнца за три миллиона лет. Эта прецессия перигелия Меркурия обусловлена релятивистскими свойствами гравитационного поля. В следующем разделе говорится: "Мы имеем две реальности: *вещество и поле*... Но деление на вещество и поле, после признания эквивалентности массы и энергии, есть нечто искусственное и неясно определенное. Не можем ли мы отказаться от понятия вещества и построить чистую физику поля?"

Создание квантовой электродинамики на стыке 1940–1950-х гг., а затем квантово-полевой теории электрослабого и сильного взаимодействий и различных моделей так называемого Великого объединения всех взаимодействий можно рассматривать как реализацию мечты Эйнштейна о единой теории поля. Но в основе всех этих теорий лежат не только теория относительности, но и квантовая механика, вероятностную интерпретацию которой Эйнштейн не мог принять, утверждая, что "Бог не играет в кости". Именно благодаря кван-

товой механике понятие материи, вещества не было изгнано из этих теорий, а, наоборот, стало их основой. Это особенно ярко проявляется в языке фейнмановских диаграмм, в которых реальные частицы (в том числе и фотоны) представляют вещество, а виртуальные — силовые поля (см. ниже).

Последняя глава IV "Кванты" посвящена рассказу о квантовой механике. В разделе "Кванты света" говорится о том, что свет состоит из зерен энергии — световых квантов — фотонов. В разделе "Волны материи" подчеркивается сходство сочетания корпускулярных и волновых свойств фотонов и электронов: "Одним из наиболее фундаментальных вопросов, поставленных современными успехами науки, является вопрос о том, как согласовать два противоречивых взгляда на вещество и волну". Авторы находятся в одном шаге от того, чтобы признать фотон такой же частицей вещества, как электрон. Но в конце книги они пишут:

"Вещество обладает зернистой структурой; оно состоит из элементарных частиц — элементарных квантов вещества. Зернистую структуру имеет электрический заряд и, что самое важное с точки зрения квантовой теории, — зернистую структуру имеет и энергия. Фотоны — это кванты энергии, из которых состоит свет".

Таким образом они отождествляют свет с энергией и противопоставляют его материи. Не в этом ли отождествлении и противопоставлении заключен один из корней путаницы с энергией и массой?

1939 г.

2 августа 1939 г. Эйнштейн по инициативе Лео Сцилларда написал знаменитое письмо президенту Ф.Д. Рузвельту, предостерегающее, что "элемент уран может быть превращен в новый важный источник энергии" [88].

1941 г. Ландау и Лифшиц

В 1941 г. вышло из печати первое русское издание книги Ландау и Лифшица *Теория поля* [93]. В ней все законы сохранения были последовательно получены из свойств симметрии пространства-времени в соответствии с теоремой Нётер. В §10 "Энергия и импульс", который в последующих изданиях стал §9, были введены 4-вектор энергии-импульса и его квадрат, равный квадрату массы, и обсуждена энергия покоя, хотя обозначения E_0 для нее введено не было. Про неаддитивность массы в теории относительности сказано как о ее несохранении. Но Эйнштейн вряд ли читал этот русский учебник. Не заметил он в 1951 г. и английского перевода [94].

1942 г.

В 1942 г. вышла книга П.Г. Бергмана [95] с предисловием Эйнштейна, в котором, в частности, говорилось:

"Эта книга не только дает исчерпывающую систематическую и логически полную трактовку теории относительности, но в ней достаточно полно представлены и ее опытные основания. ...Значительные усилия были потрачены на то, чтобы сделать эту книгу логически и педагогически удовлетворительной; д-р Бергман провел со мной много часов, которые были посвящены этой цели".

В главе VI читаем:

«...релятивистская кинетическая энергия равна

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} + E_0, \quad (6.17)$$

где E_0 постоянная интегрирования ...

$$T = mc^2 \left[\left(1 - \frac{u^2}{c^2} \right)^{-1/2} - 1 \right]. \quad (6.20)$$

Величина mc^2 называется "энергией покоя" частицы, а T — ее "релятивистской кинетической энергией".

Мне неясно, зачем понадобилось обозначать постоянную интегрирования C буквой E_0 . Не понимаю также, зачем "релятивистскую кинетическую энергию" понадобилось обозначать двумя разными буквами: E и T . Может быть, была допущена опечатка, и (6.17) — это не кинетическая, а полная энергия? Сразу за этим следует такой текст:

«Связь между энергией и массой. Величину μ , выражающую зависимость импульса от массы, часто называют "релятивистской массой" частицы, а m соответственно "массой покоя". Релятивистская масса равна полной энергии, деленной на c^2 ; масса же покоя в c^2 меньше энергии покоя. Таким образом, в теории относительности существует весьма тесная связь между массой и энергией, не имеющая аналога в классической физике».

Мы видим, таким образом, что аддитивная постоянная в выражении для энергии и зависимость массы от скорости были сохранены в этой книге. Осталась в ней и неясность, что следует называть релятивистской кинетической энергией, которая восходит к статье [61]. По-видимому, все это, так же как использование термина "релятивистская масса", в какой-то мере отражало взгляды Эйнштейна.

1945 г.

6 августа 1945 г. была сброшена атомная бомба на Хиросиму, а 9 августа — на Нагасаки.

В сентябре английский журнал *Дискавери* опубликовал фотографии первого испытательного атомного взрыва 16 июля 1945 г. и две статьи: "Прогресс науки" и "Наука, приведшая к атомной бомбе". Во второй из них в хронологии атомных открытий упоминалось: "1905. Специальная теория относительности Эйнштейна показала эквивалентность массы и энергии". Однако среди 25 портретов ученых, от Беккереля до Оппенгеймера, портрета Эйнштейна не было [96].

В сентябре 1945 г. вышла книга Г.Д. Смита *Атомная энергия для военных целей* [97]. Во введении, в разделе "Сохранение массы и энергии", говорилось:

"1.2. Существуют два принципа, ставшие краеугольными камнями здания современной науки. Первый принцип — материя не создается и не уничтожается и лишь переходит из одного вида в другой — был высказан в XVIII веке и знаком каждому изучающему химию; он известен под названием закона сохранения массы. Второй принцип — энергия не создается и не уничтожается и лишь переходит из одного вида в другой — ... известен под названием закона сохранения энергии.

1.3. ...но, в действительности, эти два принципа являются двумя аспектами единого принципа, так как мы убедились, что вещество может иногда превращаться в энергию, и энергия — в вещество".

В разделе "Эквивалентность массы и энергии" говорилось:

"1.4. Один из выводов, полученных на довольно ранней стадии развития теории относительности, состоял в том, что инертная масса движущегося тела увеличивается

с возрастанием его скорости. Это означало эквивалентность изменения энергии движения тела, т.е. его кинетической энергии и изменения его массы... Количество энергии E , эквивалентное массе m , по Эйнштейну, определяется уравнением

$$E = mc^2,$$

где c есть скорость света. Это уравнение приводит к удивительным результатам..."

В этих отрывках следует обратить внимание на следующее.

1. Отождествление материи (вещества) и массы.
2. Отсутствие упоминания закона сохранения импульса, без которого нельзя понять сохранение массы.
3. Утверждение, что масса увеличивается с возрастанием скорости.
4. Отсутствие понятия энергии покоя и формулы $E_0 = mc^2$.

Заметьте также, что Г.Д. Смит возглавлял физический факультет Принстонского университета.

1946 г.

1 июля 1946 г. еженедельник *Time* вышел с портретом Эйнштейна на обложке на фоне ядерного гриба, на котором было написано $E = mc^2$ [88].

В 1946 г. Эйнштейн опубликовал две статьи об эквивалентности массы и энергии: "Элементарный вывод эквивалентности массы и энергии" [98] и " $E = mc^2$: настоящая проблема нашего времени" [99].

В первой из них он частично изменил доказательство 1905 г. [17]: покоящееся тело не испускает, а поглощает радиацию; используется сохранение не энергии, а импульса; используются не формулы преобразования энергии и импульса излучения, а известный угол абберации звездного света, обусловленный движением Земли: $\alpha = v/c$. В результате для увеличения массы тела Эйнштейн получает: $M' - M = E/c^2$, где E — энергия поглощенного излучения, и заключает: "Это соотношение выражает закон эквивалентности энергии и массы. Увеличение энергии на E связано с увеличением массы на E/c^2 . Поскольку энергия обычно определяется с точностью до аддитивной постоянной, можем выбрать последнюю так, что $E = Mc^2$ ".

Из вывода очевидно, что E здесь означает энергию покоя тела.

Почему энергия покоя свободного тела определена с точностью до постоянной, не разясняется.

В краткой научно-популярной статье [99] Эйнштейн рассказывает вначале о законе сохранения энергии на примере кинетической и потенциальной энергии маятника, а затем переходит к сохранению массы:

"Масса определяется как противодействие тела ускорению (инертная масса). Она измеряется также весом тела (тяжелая масса). То обстоятельство, что два столь различные определения приводят к одному и тому же значению массы тела является поразительным. Согласно принципу сохранения (а именно, масса остается неизменной при любых физических или химических превращениях) масса является существенной (ввиду своей неизменности) характеристикой материи. Нагревание, плавление, испарение, образование химических соединений не должны изменять полной массы.

Физики считали этот принцип справедливым еще несколько десятилетий тому назад. Однако он оказался несостоятельным перед лицом специальной теории отно-

сительности. Поэтому он слился с законом сохранения энергии, подобно тому, как примерно шестьдесятю годами раньше закон сохранения механической энергии объединился с законом сохранения тепла. Мы могли бы сказать, что закон сохранения энергии, поглотив ранее закон сохранения тепла, включил теперь в себя и принцип сохранения массы и управляет всем единолично.

Эквивалентность массы и энергии принято выражать (хотя это и не совсем точно) формулой $E = mc^2$..."

В этом отрывке заслуживает внимания не только то, что Эйнштейн разясняет читателю, но и то, чего он не разясняет, а именно, что в теории относительности мерой инерции является не масса, а энергия, что не масса, а величина $p_\mu p_\nu / E$ создает и воспринимает гравитационное поле (а потому с точки зрения теории относительности нет ничего поразительного в равенстве инертной и тяжелой масс в ньютоновской механике: они обе равны E_0/c^2), что принцип сохранения энергии "управляет" не единолично, а вместе с принципом сохранения импульса, что энергия и импульс вместе определяют массу и ее сохранение и/или несохранение и что масса эквивалентна энергии покоя.

В 1949 г. были опубликованы "Автобиографические заметки" [100], которые Эйнштейн начал словами: "Вот я здесь сижу и пишу на 68-м году жизни что-то вроде собственного некролога". Так что писал он их в 1946–1947 гг. В этих заметках он попытался рассказать, о чем и как он думал на протяжении многих лет: "Для меня не подлежит сомнению, что наше мышление протекает в основном, минуя символы (слова), и к тому же бессознательно".

О создании общей теории относительности он говорит:

"Дело в том, что теория должна была соединять в себе следующие вещи:

1) из общих соображений частной теории относительности было ясно, что *инертная* масса физической системы при увеличении полной энергии (в частности, при увеличении кинетической энергии) должна возрастать;

2) из очень точных опытов (в особенности из опытов Этвеша с крутильными весами) было эмпирически известно с очень большой точностью, что *тяжелая* масса тела в точности равна его *инертной* массе".

При желании эти слова можно истолковать как то, что формула $E = mc^2$ не только следует из специальной (частной) теории относительности, но и является краеугольным камнем общей теории относительности.

1948 г.

В июне 1948 г. Эйнштейн в последний раз высказался о массе. В письме Л. Барнету — автору книги *Вселенная и д-р Эйнштейн*, он написал [101]:

«Нехорошо вводить такое понятие массы $M = m/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ движущегося тела, для которого нельзя дать ясного определения. Лучше не вводить никакого другого понятия кроме "массы покоя" m . Вместо того чтобы вводить M , лучше привести выражение для импульса и энергии движущегося тела».

12. 1949 год. Диаграммы Фейнмана

В 1949 г. Фейнман опубликовал статьи "Теория позитронов" [102] и "Пространственно-временной подход к квантовой электродинамике" [103]. Эти статьи придали

квантовой электродинамике форму, полностью отвечающую симметрии мира Минковского. В них был сформулирован и разработан метод фейнмановских диаграмм.

Внешние линии диаграмм отвечают реальным частицам, находящимся на массовой поверхности: для них $p^2 = m^2$, где p — 4-импульс частицы, m — ее масса. Внутренние линии отвечают виртуальным частицам, находящимся вне массовой поверхности: для них $p^2 \neq m^2$. Античастицы выглядят как частицы, движущиеся вспять по времени. Все частицы — массивные и безмассовые — описываются единообразно с той только разницей, что для последних полагается $m = 0$. (Виртуальные фотоны с положительным p^2 называются временноподобными, с отрицательным p^2 — пространственноподобными.)

Разумеется, в основе метода диаграмм лежит понятие инвариантной массы m , не зависящей от скорости частицы.

Фейнмановские диаграммы радикально упростили расчеты процессов, в которых участвуют элементарные частицы. Они объединили все виды материи как для реальных частиц, так и для виртуальных, заменивших собою силовые поля.

Ф. Дайсон, который работал в то время вместе с Фейнманом, вспоминал недавно: "В то время, когда молодые физики в Институте высших исследований в Принстоне были глубоко погружены в развитие новой электродинамики, Эйнштейн работал в том же здании и ежедневно проходил мимо наших окон по дороге в Институт и обратно. Он ни разу не пришел на наши семинары и ни разу не спросил нас о нашей работе" [104].

Как известно, в Институте высших исследований, где работал Эйнштейн, над камином было высечено его знаменитое высказывание о том, что Господь изощрен, но не злонамерен. Как тут не вспомнить его другое высказывание: "Может быть, Господь все-таки злонамерен" [105].

13. Последние годы 1952–1955

1952 г.

В 1952 г. Эйнштейн опубликовал очередное издание популярной книги *Специальная и общая теория относительности* [106], впервые опубликованной в 1917 г. [61]. Для этого издания он написал специальное приложение "Относительность и проблема пространства", с целью «показать, что пространству и времени нельзя с необходимостью приписать раздельное существование, независимо от действительных объектов физической реальности... На этом пути концепция "пустого пространства" теряет свой смысл». Эти слова Эйнштейн относит не только к общей, но и к специальной теории относительности. Понятие виртуальных частиц, по-видимому, ему чуждо.

1954 г.

Из предисловия Эйнштейна к книге Джеммера *Понятия пространства* [107] можно увидеть, что мешало Эйнштейну считать фотон материальным объектом: «Что же касается понятия пространства, то ему предшествует психологически более простое понятие места. Место — это прежде всего (небольшая) часть поверхности Земли,

называемая этим словом. Предмет, место которого указано, является "материальным объектом", или телом».

С этой точки зрения любая сколь угодно легкая частица является материальным объектом, а строго безмассовая — нет.

1955 г.

В 1895 г. 16-летний Эйнштейн написал свое первое научное эссе [108] о распространении света через эфир.

В 1955 г. в последних автобиографических заметках он вспоминает, что именно в этом юношеском возрасте его поразил такой мысленный эксперимент:

"Если со скоростью света преследовать луч света, то увидишь волновое поле, не зависящее от времени. Но, похоже, такая вещь не существует. Это был первый детский мысленный эксперимент на тему специальной теории относительности" [109].

Мысленные эксперименты играли важную роль в исследованиях Эйнштейна на протяжении всей его жизни.

Эйнштейн скончался 18 апреля 1955 г. За месяц до его кончины в Берлине на заседании, посвященном 50-летию юбилею теории относительности, выступил с докладом Леопольд Инфельд [110]. Первым из трех экспериментальных подтверждений специальной теории относительности он назвал зависимость массы от скорости. Эстафета "релятивистской массы" была передана грядущим поколениям.

14. Борн, Ландау, Фейнман

Книги Борна

Важная роль в этой эстафете принадлежит книге Макса Борна *Эйнштейновская теория относительности*. Выдающийся физик, один из создателей квантовой механики, Борн очень много сделал для пропаганды теории относительности. Первое издание его книги [111] вышло в 1920 г. (русский перевод [112] появился в 1938 г.). Следующее издание [113] вышло уже после смерти Эйнштейна, в 1962 г. (а его русский перевод [114] — в 1964 г. и 1972 г.). К сожалению, в обоих изданиях, оказавших огромное влияние на преподавание физики в XX в., без каких-либо оговорок утверждается, что возрастание массы тела с возрастанием его скорости является экспериментальным фактом. То же утверждается в [115, 116]. В 1969 г., за год до смерти, Борн опубликовал [117] свою переписку с Эйнштейном, длившуюся с 1916 г. по 1955 г. Ни в одном из более чем ста писем вопрос о зависимости (независимости) массы от скорости не был затронут. В 2005 г. вышло английское издание этой переписки [118] с пространственным предисловием, но и оно обошло молчанием вопрос о массе.

Брошюра Ландау и Румера

Выше я отметил, что книга Ландау и Лифшица *Теория поля* [93] была первой в мировой литературе монографией по теории относительности, в которой была последовательно проведена мысль о том, масса тела не зависит от его скорости. Тем непонятней, почему в популярной брошюре Ландау и Румера *Что такое теория относительности* [119, 120] авторы предпочли для первого знакомства с теорией выбрать утвержде-

ние, что масса зависит от скорости и что это экспериментальный факт. В третьем издании брошюры, опубликованном в 1975 г. Ю.Б. Румер добавил "Странички воспоминаний о Л.Д. Ландау", где, в частности, привел шуточный отзыв о брошюре, который давал ей сам Ландау: "Два жулика уговаривают третьего, что за гривенник он может понять, что такое теория относительности".

Лекции Фейнмана

Замечательные лекции по физике [117], прочитанные в Калифорнийском технологическом институте Фейнманом в 1961–1964 гг., зажгли любовь к физике в душах миллионов читателей на всем земном шаре (см., например, [118]). Они учат читателей самостоятельно и честно думать. К сожалению, в лекциях ничего не говорится о фейнмановских диаграммах, придуманных Фейнманом [102, 103] в 1949 г. и принесших ему Нобелевскую премию 1965 года. Более того, вся теория относительности вводится в этих лекциях через формулу $E = mc^2$, а не через понятие лоренц-инвариантной массы, лежащее в основе фейнмановских диаграмм.

Уже в первой главе Фейнман утверждает, что зависимость массы тела от его скорости — это экспериментальный факт, в четвертой, — что Эйнштейн открыл формулу $E = mc^2$, в седьмой, — что масса есть мера инерции. В главе 15 появляется формула $m = m_0/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ и обсуждаются следствия "релятивистского роста массы", а в главе 16 выводится эта формула. Заканчивается эта глава словами:

"Как ни странно, формула $m = m_0/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ очень редко употребляется на практике. Вместо этого незаменимыми оказываются два соотношения, которые легко доказать: $E^2 - P^2c^2 = M_0^2c^4$ и $Pc = Ev/c$ ". (В этой цитате сохранены все обозначения Фейнмана.)

Даже в главе 17, где вводится четырехмерное пространство-время и используются единицы, в которых $c = 1$, Фейнман по-прежнему говорит о массе покоя m_0 , а не просто о массе m .

В течение 2007 г. я расспрашивал по электронной почте бывших учеников, сотрудников и соавторов Фейнмана. Никто из них не мог вспомнить ни одного случая, когда бы в обсуждениях с ними Фейнман использовал понятие релятивистской массы или формулу $E = mc^2$. А несколько миллионов читателей его лекций твердо уверены, что масса зависит от скорости.

Каким образом великий физик, давший нам язык фейнмановских диаграмм, мог положить в основу фейнмановских лекций понятие массы, зависящей от скорости?

Ответ на этот вопрос, возможно, дает Нобелевская лекция Фейнмана [119]. Он описывает в ней многочисленные "тушки", в которые он попадал на своем пути к построению квантовой электродинамики, и выражает уверенность в том, что "множество разных физических идей может описывать одну и ту же физическую реальность". (В частности, про идею движущегося назад по времени электрона он пишет: "Она оказалась очень удобной, но не обязательно необходимой для теории, так как она в точности эквивалентна представлению о море отрицательных энергий". Но ведь без движущегося вспять по времени электрона не было бы фейнмановских диаграмм, внесших порядок и гармонию во многие области физики.)

15. Эпилог

Почему сорняк массы, зависящей от скорости, так устойчив? Прежде всего, потому что в смысле арифметики и алгебры в нем ошибки нет. В любую самосогласованную теорию можно ввести дополнительные "квазифизические величины" путем умножения истинных физических величин на произвольные степени скорости света. Самым ярким примером такой "квазивеличины" является так называемая "релятивистская масса". При известной тщательности вычислений результаты расчетов будут те же, что и в исходной теории. Однако в более высоком смысле теория при введении "квазивеличин" оказывается изуродованной, так как нарушаются ее свойства симметрии. Релятивистская масса представляет собой одну компоненту 4-вектора, в то время как о трех других его компонентах даже не упоминают.

Отметим еще несколько объяснений живучести релятивистской массы. Формула $E = mc^2$ "проще" формулы $E_0 = mc^2$, поскольку в ней нет требующего пояснений дополнительного нулевого индекса. Энергия, деленная на c^2 , действительно имеет размерность массы. Интуиция, основанная на житейском опыте, подсказывает, что именно масса, а не энергия, является мерой инерции тела и побуждает "тащить" в теорию относительности нерелятивистскую формулу $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$. В меньшей степени эта же интуиция побуждает считать источником гравитации "родную" массу, а не какую-то "чужую" величину $p_\mu p_\nu/E$. Особенно сопротивляется житейская интуиция необходимости рассматривать свет как вид материи.

Приведенные выше аргументы могут объяснить "ньютоновские пристрастия" рядового человека, так сказать "пешехода". Но применять их к такому великому физическому, как Эйнштейн, слишком легкомысленно. Ведь именно он ввел понятие энергии покоя E_0 в физику и гораздо чаще писал о $E_0 = mc^2$, чем о $E = mc^2$. Но что остается необъяснимым: почему за полвека, в течение которых Эйнштейн обсуждал связь массы и энергии, он ни разу не привел в своих трудах и письмах формулу $E^2 - \mathbf{p}^2c^2 = m^2c^4$, определяющую лоренц-инвариантную массу?

Возможно, в формулировке о полной эквивалентности энергии и массы отразилось его безусловное доверие к своей могучей интуиции. Ведь именно оно, это доверие, обусловило неприятие им квантовой механики. Кажется, что понятие электромагнитного поля он воспринимал не только разумом, но и всем телом. И волновую функцию он воспринимал так же, как электромагнитную волну. Неприятие квантовой механики помешало пересечению мировых линий Эйнштейна и Фейнмана в пространстве идей, так сказать в ноосфере. Следствием явилось, в частности, то, что Эйнштейн так и не воспринял фотон как частицу материи, а продолжал считать его квантом энергии.

16. Заключение

Осматривая выставку в Манеже в 1962 г., Никита Хрущёв (1894–1971) обрушился с бранью на скульптура Эрнста Неизвестного. Когда Хрущёв умер, его дети попросили Неизвестного создать памятник на могиле отца. Основная часть памятника — две вертикальные плиты — из черного и белого мрамора, проникающие друг в друга

своими выступлениями и как бы олицетворяющие зло и добро.

История борьбы двух концепций массы в XX в. похожа на эту скульптуру. Свет и тьма боролись друг с другом в каждом из великих творцов современной физики.

Принято считать "политически корректным" отстаивание плюрализма мнений. А отстаивание правильности какой-то одной точки зрения — рассматривать как проявление догматизма. Замечательным примером плодотворности плюрализма является дуализм волн и корпускул в квантовой механике.

Однако имеются случаи, когда ситуация созрела для выбора определенной терминологии. Именно такова ситуация в вопросе о соотношении массы и энергии. Пришла пора прекратить обманывать все новые поколения школьников и студентов, внушая им, что возрастание массы с увеличением скорости — это экспериментальный факт.

Постскриптум. Памяти Дж.А. Уилера

Когда эта статья была закончена, пришла печальная весть о том, что 13 апреля 2008 г. на 97-м году жизни скончался выдающийся физик и педагог Джон Арчибальд Уилер, так много сделавший для установления пространственно-временной трактовки теории относительности и понятия лоренц-инвариантной массы. Его светлой памяти я посвящаю эту статью.

Благодарности. Я благодарен за неоценимую помощь Б.Л. Окуню, М.Б. Волошину, В.И. Кисину. Очень полезные советы дали А.А. Абрикосов, М.С. Аксентьева, А.А. Алёхина, Б.Л. Альтшулер, Т. Басалья, Дж. Бардин, С.М. Берман, С.И. Блишников, Б.М. Болотовский, К.Г. Боресков, Л.М. Браун, Д.К. Бухвальд, А.И. Вайнштейн, В.П. Визгин, М.И. Высоцкий, М.А. Готтлиб, Д.Р. Гофстадтер, Я.И. Грановский, Э.Г. Гуляева, Ю.Б. Даноян, Дж.Д. Джексон, А.Д. Долгов, В.Р. Золлер, Е.А. Ильина, О.В. Канчели, М. Карлинер, К. Квигг, Т.Л. Кёртрайт, Я.С. Ким, В.И. Коган, Г.Л. Ландсберг, Р. Лейтон, Л.Ю. Мизрахи, В.А. Новиков, Л.И. Пономарёв, П.С. Прокофьев, Ф. Равндад, А.Н. Скринский, М. Сэндс, С.Г. Тиходеев, К.А. Томилин, И.Б. Хриплович, Дж. Цвайг, М. Янссен, С. Ярлског. Работа была поддержана грантами НШ-5603.2006.2, НШ-4568.2008.2 и РФФИ-07-02-00830-а.

Список литературы²

1. Эйнштейн А *Собрание научных трудов А. Эйнштейна* Т. 1 – 4 (Под ред. И Е Тамма, Я А Смородинского, Б Г Кузнецова) (М.: Наука, 1967)
2. Einstein A *The Collected Papers of Albert Einstein* Vols 1 – 10 (Eds J Stachel (Vols 1, 2), D C Cassidy (Vols 1, 2), R Schulman (Vols 1 – 8), J Renn (Vols 2 – 4), M J Klein (Vols 3 – 6), A J Cox (Vols 3 – 6, 8), M Janssen (Vols 7, 8), J Illy (Vols 7 – 10), C Lehner (Vol. 7), D K Buchwald (Vol. 10), T Sauer (Vol. 10), Z Rosenkranz (Vol. 10), V I Holmes (Vol. 10)) (Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1987 – 2006)
3. Einstein A *The Collected Papers of Albert Einstein* Vols 1 – 10 (Translators A Beck (Vols 1 – 3, 5), D Howard (Vol. 4), A Engel (Vols 6, 7), A Hentschel (Vols 8 – 10)) (Princeton, NJ: Princeton University Press, 1987 – 2006)
4. Galilei G *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo Tolemaico e Copernicano* (Firenza, Per Gio: Batista Landini, 1632) [Translated into English: Dialogue concerning the two chief world systems, Ptolemaic and Copernican (Berkeley, Calif.: Univ. of California Press, 1967); Перевод на русск. яз.: Галилей Г *Диалог о двух главнейших системах мира Птолемеовой и Коперниковой* (Перевод А И Долгова) (М. – Л.: ОГИЗ, 1948)]
5. Newton I *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Londini: Jussu Societatis Regiae, 1687) [Translated into English: *The Principia: mathematical principles of natural philosophy* (Berkeley, Calif.: Univ. of California Press, 1999); Ньютон И *Математические начала натуральной философии* (Перевод с лат. и коммент. А Н Крылова) (М.: Наука, 1989)]
6. Лоренц Г А, Пуанкаре А, Эйнштейн А, Минковский Г *Принцип относительности. Сборник работ классиков релятивизма* (Под ред. В К Фредерикса, Д Д Иваненко) (М. – Л.: ОНТИ, 1935)
7. Thomson J "On the electric and magnetic effects produced by the motion of electrified bodies" *Philos. Mag.* **11** (8) 229 – 249 (1881)
8. Heaviside O "On the electromagnetic effects due to the motion of electrification through a dielectric" *Philos. Mag.* **27** 324 – 339 (1889)
9. Searle G "On the Steady Motion of an Electrified Ellipsoid" *Philos. Mag.* **44** 329 – 341 (1897)
10. Abraham M "Prinzipien der Dynamik des Elektrons" *Ann. Phys. (Leipzig)* **10** [315] (1) 105 – 179 (1902)²
11. Lorentz H "Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light" *Proc. Acad. of Sci., Amsterdam* **6** 809 – 831 (1904) [Лоренц Г А "Электромагнитные явления в системе, движущейся с любой скоростью, меньшей скорости света", в сб.: Лоренц Г А, Пуанкаре А, Эйнштейн А, Минковский Г *Принцип относительности. Сборник работ классиков релятивизма* (Под ред. В К Фредерикса, Д Д Иваненко) (М. – Л.: ОНТИ, 1935) с. 16]
12. Poincaré H "La théorie de Lorentz et le principe de réaction" *Arch. Néerland. Sci. Exactes Naturelles* **5** 252 – 278 (1900)
13. Kaufmann W "Die elektromagnetische Masse des Elektrons" *Phys. Z.* **4** 54 – 57 (1902)
14. Bucherer A "On the principle of relativity and on the electromagnetic mass of the electron. A Reply to Mr. E. Cunningham" *Philos. Mag.* **15** 316 – 318 (1908)
15. Bucherer A "Messungen an Becquerelstrahlen. Die experimentelle Bestätigung der Lorentz – Einsteinschen Theorie" *Phys. Z.* **9** 755 – 762 (1908)
16. Einstein A "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt" *Ann. Phys. (Leipzig)* **17** [322] 132 – 148 (1905) ["On a heuristic point of view concerning the production and transformation of light", in *CPAET* Vol. 2, doc. 14; Эйнштейн А "Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света", в кн. *СНТ* Т. 3, с. 92]
17. Einstein A "Zur Elektrodynamik bewegter Körper" *Ann. Phys. (Leipzig)* **17** [322] 891 – 921 (1905) ["On the electrodynamics of moving bodies", in *CPAET* Vol. 2, doc. 23; Эйнштейн А "К электродинамике движущихся тел", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 7]
18. Einstein A "Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?" *Ann. Phys. (Leipzig)* **18** [323] 639 – 641 (1905) ["Does the inertia of a body depend on its energy content?", in *CPAET* Vol. 2, doc. 24; Эйнштейн А "Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии?", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 36]
19. Planck M "Über irreversible Strahlungsvorgänge" *Ann. Phys. (Leipzig)* **1** [306] 69 – 122 (1900) [Планк М "О необратимых процессах излучения", в кн.: Планк М *Избранные труды* (М.: Наука, 1975) с. 191]
20. Einstein A "Letter to Conrad Habicht, 30 June – 22 September 1905", in *CPAET* Vol. 5, doc. 28
21. Seelig C *Albert Einstein. Leben und Werk eines Genies unserer Zeit* (Zürich: Europa Verlag, 1952) [Зелиг К *Альберт Эйнштейн* (Сокр. пер. с нем.) (М.: Атомиздат, 1964) с. 65; 2-е изд. (М.: Атомиздат, 1966) с. 73]

² В большинстве нижеприведенных ссылок я старался сопроводить библиографическую информацию об исходном источнике на немецком языке соответствующей информацией о его переводах на английский и русский языки. В дальнейшем *СНТ* — это ссылка на [1], *CPAE* — на [2], и *CPAET* — на [3]. Для журнала *Annalen der Physik* номер тома в квадратных скобках соответствует новой схеме, введенной на сайте Wiley InterScience.

22. Einstein A "Das Prinzip von der Erhaltung der Schwerpunktsbewegung und die Trägheit der Energie" *Ann. Phys.* (Leipzig) **20** [325] 627–633 (1906) ["The principle of conservation of motion of the center of gravity and the inertia of energy", in *CPAET* Vol. 2, doc. 35; Эйнштейн А "Закон сохранения движения центра тяжести и инерция энергии", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 39]
23. Einstein A "Über eine Methode zur Bestimmung des Verhältnisses der transversalen und longitudinalen Masse des Elektrons" *Ann. Phys.* (Leipzig) **21** [326] 583–586 (1906) ["On a method for the determination of the ratio of the transverse and the longitudinal mass of the electron", in *CPAET* Vol. 2, doc. 36; Эйнштейн А "О методе определения соотношения между поперечной и продольной массами электрона", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 45]
24. Einstein A "Über die Möglichkeit einer neuen Prüfung des Relativitätsprinzips" *Ann. Phys.* (Leipzig) **23** [328] 197–198 (1907) ["On the possibility of a new test of the relativity principle", in *CPAET* Vol. 2, doc. 41; Эйнштейн А "О возможности нового доказательства принципа относительности", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 49]
25. Einstein A «Bemerkungen zu der Notiz von Hrn. Paul Ehrenfest: "Die Translation deformierbarer Elektronen und der Flächensatz"» *Ann. Phys.* (Leipzig) **23** [328] 206–208 (1907) [«Comments on the note by Mr. Paul Ehrenfest: "The translatory motion of deformable electron and the area law"», in *CPAET* Vol. 2, doc. 44; Эйнштейн А «По поводу заметки Пауля Эренфеста "Поступательное движение деформируемых электронов и теорема площадей"», в кн. *СНТ* Т. 1, с. 51]
26. Einstein A "Über die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie" *Ann. Phys.* (Leipzig) **23** [328] 371–384 (1907) ["On the inertia of energy required by the relativity principle", in *CPAET* Vol. 2, doc. 45; Эйнштейн А "Об инерции энергии, требуемой принципом относительности", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 53]
27. Einstein A "Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogene Folgerungen" *Jahrbuch Radioaktivität Elektron.* **4** 411–462 (1907) ["On the relativity principle and the conclusions drawn from it", in *CPAET* Vol. 2, doc. 47; Эйнштейн А "О принципе относительности и его следствиях", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 65]
28. Einstein A «Berichtigung zu der Arbeit, "Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogene Folgerungen"» *Jahrbuch Radioaktivität Elektron.* **5** 98–99 (1908) [«Corrections to the paper "On the relativity principle and the conclusions drawn from it"», in *CPAET* Vol. 2, doc. 49]
29. Einstein A, Laub J "Über die elektromagnetischen Grundgleichungen für bewegte Körper" *Ann. Phys.* (Leipzig) **26** [331] 532–540 (1908) ["On the fundamental electromagnetic equations for moving bodies", in *CPAET* Vol. 2, doc. 51; Эйнштейн А, Лауб Я "Об основных электродинамических уравнениях движущегося тела", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 115]
30. Einstein A, Laub J "Über die im elektromagnetischen Felde auf ruhende Körper ausgeübten ponderomotorischen Kräfte" *Ann. Phys.* (Leipzig) **26** [331] 541–550 (1908) ["On the ponderomotive forces exerted on bodies at rest in the electromagnetic field", in *CPAET* Vol. 2, doc. 52; Эйнштейн А, Лауб Я "О пондеромоторных силах, действующих в электромагнитном поле на покоящиеся тела", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 126]
31. Einstein A, Laub J «Berichtigung zur Abhandlung: "Über die elektromagnetischen Grundgleichungen für bewegte Körper"» *Ann. Phys.* (Leipzig) **27** [332] 232–232 (1908) [«Correction to the paper: "On the fundamental electromagnetic equations for moving bodies"», in *CPAET* Vol. 2, doc. 53; включено в кн. *СНТ* Т. 1, с. 115]
32. Einstein A, Laub J «Bemerkungen zu unserer Arbeit: "Über die elektromagnetischen Grundgleichungen für bewegte Körper"» *Ann. Phys.* (Leipzig) **28** [333] 445–447 (1909) [«Remarks on our paper "On the fundamental electromagnetic equations for moving bodies"», in *CPAET* Vol. 2, doc. 54; Эйнштейн А, Лауб Я «Замечания к нашей работе "Об основных электродинамических уравнениях движущегося тела"», в кн. *СНТ* Т. 1, с. 123]
33. Minkowski H "Raum und Zeit" *Phys. Z.* **10** 104–111 (1909) ["Space and time", in: Einstein A, Lorentz H A, Minkowski H, Weyl H *The Principle of Relativity: a Collection of Original Memoirs on the Special and General Theory of Relativity* (London: Methuen, 1923); reprinted (New York: Dover, 1952); Минковский Г "Пространство и время" *УФН* **69** 303 (1959), см. также: Лоренц Г А, Пуанкаре А, Эйнштейн А, Минковский Г *Принцип относительности. Сборник работ классиков релятивизма* (Под ред. В К Фредерикса, Д Д Иваненко) (М.–Л.: ОНТИ, 1935) с. 181]
34. Lewis G "A revision of the fundamental laws of matter and energy" *Philos. Mag.* **16** 705–717 (1908)
35. Lewis G, Tolman R "The principle of relativity & non-newtonian mechanics" *Philos. Mag.* **17** 510–523 (1909)
36. Tolman R "Note on the derivation from the principle of relativity of the fifth fundamental equation of the Maxwell–Lorentz theory" *Philos. Mag.* **21** 296–301 (1911)
37. Tolman R "Non-newtonian mechanics: The direction of force and acceleration" *Philos. Mag.* **22** 458–463 (1911)
38. Tolman R "Non-newtonian mechanics — the mass of a moving body" *Philos. Mag.* **23** 375–380 (1912)
39. Einstein A «Bemerkung zu der Arbeit von D. Mirimanoff: "Über die Grundgleichungen..."» *Ann. Phys.* (Leipzig) **28** [333] 885–888 (1909) [«Comment on the paper of D. Mirimanoff "On the fundamental equations..."», in *CPAET* Vol. 2, doc. 55; Эйнштейн А «Замечание к работе Мириманова "Об основных уравнениях..."», в кн. *СНТ* Т. 1, с. 135]
40. Einstein A "Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems" *Phys. Z.* **10** 185–193 (1909) ["On the present status of the radiation problem", in *CPAET* Vol. 2, doc. 56; Эйнштейн А "К современному состоянию проблемы излучения", в кн. *СНТ* Т. 3 с. 164]
41. Ritz W, Einstein A "Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems" *Phys. Z.* **10** 323–324 (1909) ["On the present status of the radiation problem", in *CPAET* Vol. 2, doc. 57; Ритц В, Эйнштейн А "К современному состоянию проблемы излучения", в кн. *СНТ* Т. 3, с. 180]
42. Einstein A "Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung" *Verhandl. Deutsche Phys. Gesellschaft* **11** 482–500 (1909) ["On the development of our views concerning the nature and constitution of radiation", in *CPAET* Vol. 2, doc. 60; Эйнштейн А "О развитии наших взглядов на сущность и структуру излучения", в кн. *СНТ* Т. 3, с. 187]
43. Einstein A, Hopf L "Über einen Satz der Wahrscheinlichkeitsrechnung und seine Anwendung in der Strahlungstheorie" *Ann. Phys.* (Leipzig) **33** [338] 1096–1104 (1910) ["On a theorem of the probability calculus and its application in the theory of radiation", in *CPAET* Vol. 3, doc. 7; Эйнштейн А, Хопф Л "Об одной теореме теории вероятностей и ее применении в теории излучения", в кн. *СНТ* Т. 3, с. 196]
44. Einstein A, Hopf L "Statistische Untersuchung der Bewegung eines Resonators in einem Strahlungsfeld" *Ann. Phys.* (Leipzig) **33** [338] 1105–1115 (1910) ["Statistical investigation of a resonator's motion in a radiation field", in *CPAET* Vol. 3, doc. 8; Эйнштейн А, Хопф Л "Статистическое исследование движения резонатора в поле излучения", в кн. *СНТ* Т. 3, с. 205]
45. Einstein A "Le principe de relativité et ses conséquences dans la physique moderne" *Arch. Sci. Phys. Naturelles* **29** 5–28 (1910) ["The principle of relativity and its consequences in modern physics", in *CPAET* Vol. 3, doc. 2; Эйнштейн А "Принцип относительности и его следствия в современной физике", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 138]
46. Einstein A "Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes" *Ann. Phys.* (Leipzig) **35** [340] 898–908 (1911) ["On the influence of gravitation on the propagation of light", in *CPAET* Vol. 3, doc. 23; Эйнштейн А "О влиянии силы тяжести на распространение света", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 165]
47. Einstein A "Die Relativitätstheorie" *Vierteljahrsschrift Naturforsch. Gesellschaft* (Zürich) **56** 1–14 (1911) ["The theory of relativity", in *CPAET* Vol. 3, doc. 17; Эйнштейн А "Теория относительности", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 175]
48. Einstein A "Zum Ehrenfest'schen Paradoxon. Bemerkung zu V. Varicak's Aufsatz" *Phys. Z.* **12** 509–510 (1911) ["On the Ehrenfest paradox. Comment on V. Varicak's paper", in *CPAET* Vol. 2, doc. 23; Эйнштейн А "К парадоксу Эренфеста", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 187]
49. von Soldner J "Über die Ablenkung eines Lichtstrahls von seiner geradlinigen Bewegung durch die Attraktion eines Weltkörpers an welchem er nahe vorbeigeht", in *Astronomisches Jahrbuch für das Jahr 1804* (Berlin, 1801) pp. 161–172 ["On the deviation of a light ray from its motion along straight line through the attraction of a celestial body which it passes close by" *Found. Phys.* **8** 939–950 (1978)]

50. Jaki S "Johan Georg von Soldner and the gravitational bending of light, with an english translation of his essay on it published in 1801" *Found. Phys.* **8** 927–938 (1978)
51. Einstein A "Manuscript on the special theory of relativity (1912–1914)", in *CPAET* Vol. 4, doc. 1
52. Einstein A "Lichtgeschwindigkeit und Statik des Gravitationsfeldes" *Ann. Phys. (Leipzig)* **38** [343] 355–369 (1912) ["The speed of light and the statics of the gravitational field", *CPAET* Vol. 4, doc. 3; Эйнштейн А "Скорость света и статическое гравитационное поле", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 189]
53. Einstein A "Zur Theorie des statischen Gravitationsfeldes" *Ann. Phys. (Leipzig)* **38** [343] 443–458 (1912) ["On the theory of the static gravitational field", in *CPAET* Vol. 4, doc. 4; Эйнштейн А "К теории статического гравитационного поля", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 202]
54. Einstein A "Relativität und Gravitation. Erwiderung auf eine Bemerkung von M. Abraham" *Ann. Phys. (Leipzig)* **38** [343] 1059–1064 (1912) ["Relativity and gravitation. Reply to a comment by M. Abraham", in *CPAET* Vol. 4, doc. 8; Эйнштейн А "Относительность и гравитация. Ответ на замечание М. Абрагама", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 217]
55. Einstein A "Gibt es eine Gravitationswirkung die der elektrodynamischen Induktionswirkung analog ist?" *Vierteljahrsschrift gericht. Med. öffentliches Sanitätswesen* **44** 37–40 (1912) ["Is there a gravitational effect which is analogous to electrodynamic induction?", in *CPAET* Vol. 4, doc. 7; Эйнштейн А "Существует ли гравитационное воздействие, аналогичное электродинамической индукции?", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 223]
56. Einstein A, Grossmann M "Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation" *Z. Math. Phys.* **62** 225–261 (1913) ["Outline of a generalized theory of relativity and of a theory of gravitation", in *CPAET* Vol. 4, doc. 13; Эйнштейн А, Гроссман М "Проект обобщенной теории относительности и теории тяготения", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 227]
57. Einstein A "Nachtragliche Antwort auf eine Frage von Reißner" *Phys. Z.* **15** 108–110 (1914) ["Supplementary response to a question by Mr. Reißner", in *CPAET* Vol. 4, doc. 24; Эйнштейн А "Дополнительный ответ на вопрос Рейснера", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 229]
58. Einstein A "Lecture notes for course on relativity at the University of Berlin, winter semester 1914/1915", in *CPAET* Vol. 6, doc. 7
59. Einstein A "Die Feldgleichungen der Gravitation" *Sitzungsber. Königl. Preuß. Akad. Wissenschaft. (Berlin)* **48** 844–847 (1915) ["The field equations of gravitation", in *CPAET* Vol. 6, doc. 25; Эйнштейн А "Уравнения гравитационного поля", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 448]
60. Einstein A "Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie" *Sitzungsber. Königl. Preuß. Akad. Wissenschaft. (Berlin)* **47** (2) 831–839 (1915) ["Explanation of the perihelion motion of Mercury from the general theory of relativity", in *CPAET* Vol. 6, doc. 24; Эйнштейн А "Объяснение движения перигелия Меркурия в общей теории относительности", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 439]
61. Einstein A *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, gemeinverständlich* Vol. 38 (Braunschweig, Germany: Friedrich Vieweg und Sohn, 1917) ["On the special and general theory of relativity (a popular account)", in *CPAET* Vol. 6, doc. 42; Эйнштейн А "О специальной и общей теории относительности (общедоступное изложение)", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 537]
62. Einstein A "Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie" *Sitzungsber. Königl. Preuß. Akad. Wissenschaft. (Berlin)* **1** 142–152 (1917) ["Cosmological considerations in the general theory of relativity", in *CPAET* Vol. 6, doc. 43; Эйнштейн А "Вопросы космологии и общая теория относительности", в кн. *СНТ* Т. 1, с. 601]
63. Friedmann A "Über die Krümmung des Raumes" *Z. Phys.* **10** (1) 377–386 (1922) [Фридман А "О кривизне пространства" *Журн. Русск. физ.-хим. общ-ва* **56** 59 (1924)]
64. Friedmann A "Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes" *Z. Phys.* **21** (1) 326–332 (1924) [Фридман А "О возможности мира с постоянной отрицательной кривизной пространства" *УФН* **80** 447 (1963)]
65. Einstein A "Bemerkung zu der Arbeit von A. Friedmann: Über die Krümmung des Raumes" *Z. Phys.* **11** 326 (1922) [Эйнштейн А «Замечание к работе А. Фридмана "О кривизне пространства"», в кн. *СНТ* Т. 2, с. 118; *УФН* **80** 454 (1963)]
66. Einstein A "Notiz zu der Bemerkung zu der Arbeit von A. Friedmann: Über die Krümmung des Raumes" *Z. Phys.* **16** 228 (1922) [Эйнштейн А «К работе А. Фридмана "О кривизне пространства"», в сб. *СНТ* Т. 2, с. 119; *УФН* **80** 454 (1963)]
67. Hubble E "A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae" *Proc. Natl. Acad. Sci.* **15** 168–173 (1929)
68. Einstein A «Appendix to the second edition. On the "cosmologic problem"», in *The Meaning of Relativity* 2nd ed. (Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1945) [Эйнштейн А «О "космологической проблеме"», в кн. *СНТ* Т. 2, с. 597]
69. Старобинский А А "Спектр реликтового гравитационного излучения и начальное состояние Вселенной" *Письма ЖЭТФ* **30** 719–723 (1979) [Starobinsky A A "Spectrum of relict gravitational radiation and the early state of the universe" *JETP Lett.* **30** 682–685 (1979)]
70. Guth A H "The inflationary universe: a possible solution to the horizon and flatness problems" *Phys. Rev. D* **23** 347–356 (1981)
71. Linde A D "A new inflationary universe scenario: A possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems" *Phys. Lett. B* **108** 389–393 (1982)
72. Riess A G et al. (Supernova Search Team) "Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant" *Astron. J.* **116** 1009–1038 (1998)
73. Perlmutter S et al. (The Supernova Cosmology Project) "Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae" *Astrophys. J.* **517** 565–586 (1999)
74. Astier P et al. (Supernova Legacy Survey) "The supernova legacy survey: Measurement of Ω_M , Ω_Λ and w from the first year data set" *Astron. Astrophys.* **447** 31–48 (2006)
75. Noether E "Invariante Variationsprobleme" *Nachricht. Königlichen Gesellschaft Wissenschaft. Göttingen. Math.-phys. Kl.* 235–257 (1918)
76. Einstein A "Letter to David Hilbert, 24 May 1918", in *CPAET* Vol. 8, doc. 548
77. Einstein A "Der Energiesatz in der allgemeinen Relativitätstheorie" *Sitzungsber. Königlich Preuß. Akad. Wissenschaft. (Berlin)* **1** 448–459 (1918) ["The law of energy conservation in the general theory of relativity", in *CPAET* Vol. 7, doc. 9; Эйнштейн А "Закон сохранения энергии в общей теории относительности", в кн. *СНТ* Т. 1]
78. Einstein A "Prüfung der allgemeinen Relativitätstheorie" *Naturwissenschaft.* **7** 776 (1919) ["A test of the general theory of relativity", in *CPAET* Vol. 7, doc. 23; Эйнштейн А "Доказательство общей теории относительности", в кн. *СНТ* Т. 1]
79. Einstein A "Was ist die Relativitäts-Theorie?" *The Times* (28 November 1919) ["What is the theory of relativity?", in *CPAET* Vol. 7, doc. 25; Эйнштейн А "Что такое теория относительности?", в кн. *СНТ* Т. 1]
80. Einstein A "Grundgedanken und Methoden der Relativitätstheorie, in ihrer Entwicklung dargestellt" (1920). [Fundamental ideas and methods of the theory of relativity, presented in their developments", in *CPAET* Vol. 7, doc. 31]
81. Einstein A "Meine Antwort. Ueber die anti-relativitätstheoretische G.m.b.H." *Berliner Tageblatt* (27 August 1920) ["My response. On the anti-relativity company", in *CPAET* Vol. 7, doc. 45; Эйнштейн А "Мой ответ. По поводу антирелятивистского акционерного общества", в кн. *СНТ* Т. 1]
82. Einstein A "Vier Vorlesungen Über Relativitätstheorie, Gehalten im Mai, 1921, an der Universität Princeton" (Braunschweig, Germany: Friedrich Vieweg und Sohn, 1922) ["Four lectures on the theory of relativity, held at Princeton University in May 1921, in *CPAET* Vol. 7, doc. 71; Эйнштейн А "Сущность теории относительности", в кн. *СНТ* Т. 2, с. 5]
83. Леман И *Теория относительности*. Популярное изложение без математических формул (Пер. с евр. И Румера, Сер. "Книга для всех") (М.: Работник просвещения, 1922)
84. Einstein A "Newtons Mechanik und ihr Einfluß auf die Gestaltung der theoretischen Physik" *Naturwissenschaft* **15** (12) 273–276 (1927) ["The mechanics of Newton and their influence on the development of theoretical physics", in: Einstein A *Essays in Science* (New York: Philosophical Library, 1934) p. 28; Эйнштейн А "Механика Ньютона и ее влияние на формирование теоретической физики", в кн. *СНТ* Т. 4, с. 82]

85. Einstein A "Fundamental concepts of physics and their most recent changes" *St. Louis Post-Dispatch* (9 December 1928) [Эйнштейн А "Фундаментальные понятия физики и изменения, которые произошли в них за последнее время", в кн. *СНТ Т. 4*, с. 103]
86. Einstein A "Space-time", in *Encyclopaedia Britannica* Vol. XXI, 14th edn. (1929) pp. 105–108 [Эйнштейн А "Пространство-время", в кн. *СНТ Т. 2*, с. 234]
87. Einstein A "Ansprache von Prof. Einstein an Prof. Planck" *Forschung. Fortschr.* 5 248–249 (1929) [Эйнштейн А "Речь на юбилее Профессора Планка", в кн. *СНТ Т. 4* с. 109]
88. Friedman A J, Donley C C *Einstein as Myth and Muse* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1985)
89. Einstein A "Elementary derivation of the equivalence of mass and energy" *Bull. Am. Math. Soc.* 41 223–230 (1935) [Эйнштейн А "Элементарный вывод эквивалентности массы и энергии", в кн. *СНТ Т. 2*, с. 416]
90. Einstein A "The late Emmy Noether" *New York Times* (4 May 1935) [Эйнштейн А "Памяти Эмми Нетер", в кн. *СНТ Т. 4*, с. 198]
91. Einstein A, Podolsky B, Rosen N "Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?" *Phys. Rev.* 47 (10) 777–780 (1935) [Эйнштейн А, Подольский Б, Розен Н "Можно ли считать квантовомеханическое описание физической реальности полным?", в кн. *СНТ Т. 3*, с. 604]
92. Einstein A, Infeld L *The Evolution of Physics: the Growth of Ideas from Early Concepts to Relativity and Quanta* (New York: Simon and Schuster, 1938)
93. Ландау Л Д, Лифшиц Е М *Теория поля* (М.–Л.: Гостехиздат, 1941)
94. Landau L D, Lifshitz E M *The Classical Theory of Fields* (Cambridge, MA: Addison-Wesley Press, 1951)
95. Bergmann P G *Introduction to the theory of relativity* (New York: Prentice-Hall, 1942) [Бергман П Г *Введение в теорию относительности* (С предисл. А Эйнштейна, Пер. С англ. Под ред. В Л Гинзбурга) (М.: ИЛ, 1947)]
96. *Discovery* (September 1945)
97. Smyth H *Atomic Energy for Military Purposes: The Official Report on the Development of the Atomic Bomb under the Auspices of the United States Government, 1940–1945* (Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1945) [Смит Г *Атомная энергия для военных целей. Официальный отчет о разработке атомной бомбы под наблюдением правительства США* (Пер. с англ. под ред. Г Н Иванова) (М.: Трансжелдориздат, 1946)]
98. Einstein A "Elementary derivation of the equivalence of mass and energy" *Technion J.* 5 16 (1946)
99. Einstein A "E = mc²: The most urgent problem of our time" *Sci. Illustrated* 1 16–17 (1946)
100. Einstein A "Autobiographical notes", in *Albert Einstein, Philosopher-Scientist* (The Library of Living Philosophers, Vol. 7, Ed. P A Schilpp) (Evanston, IL: Library of Living Philosophers, 1949) [Эйнштейн А "Автобиографические заметки", в кн. *СНТ Т. 4*, с. 259]
101. Einstein A "Letter to L. Barnett, 19 June 1948", in: Okun L B "The concept of mass" *Phys. Today* 42 (6) 31–36 (1989)
102. Feynman R P "The theory of positrons" *Phys. Rev.* 76 749–759 (1949)
103. Feynman R P "Space-time approach to quantum electrodynamics" *Phys. Rev.* 76 769–789 (1949)
104. Dyson F "The world on a string" *The New York Review of Books* (51) (May 13, 2004)
105. Calaprice A *The quotable Einstein* (Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1996)
106. Einstein A "Appendix V. Relativity and the problem of space", in *Relativity, the Special and the General Theory, A Popular Exposition* 15th ed. (New York: Crown Publ., 1952) [Эйнштейн А "Относительность и проблема пространства", в кн. *СНТ Т. 2*, с. 744]
107. Jammer M *Concepts of Space: the History of Theories of Space in Physics* (Cambridge, MA: Harvard Univ. Press, 1954)
108. Einstein A "On the investigation of the state of the ether in a magnetic field", in *CPAE* Vol. 1, doc. 4 (1895)
109. Einstein A "Erinnerungen — Souvenirs" *Schweiz. Hochschulzeitung, Sonderheft 100 Jahre ETH* 28 145–153 (1955); Reprinted as "Autobiographische Skizze", in *Helle Zeit-dunkle Zeit; in Memoriam Albert Einstein* (Ed. C Seelig) (Zürich: Europa, 1956) p. 9 [Эйнштейн А "Автобиографические наброски", в кн. *СНТ Т. 4*, с. 350]
110. Инфельд Л "История развития теории относительности" *УФН* 57 193 (1955)
111. Born M *Die Relativitätstheorie Einsteins und ihre physikalische Grundlagen gemeinverständlich dargestellt* (Berlin: Springer, 1920)
112. Борн М *Теория относительности Эйнштейна и ее физические основы* (М.: ОНТИ, 1938)
113. Born M *Einstein's Theory of Relativity* (New York: Dover, 1962)
114. Борн М *Эйнштейновская теория относительности* (Пер. с англ. Н В Мицкевича) (М.: Мир, 1964, 2-е изд., 1972)
115. Born M *Atomic physics* (London: Blackie, 1963)
116. Борн М *Атомная физика* (М.: Мир, 1967)
117. Einstein A, Born M, Born H *Albert Einstein, Hedwig und Max Born: Briefwechsel, 1916–1955* (München: Nymphenburger Verlagshandlung, 1969)
118. Born M, in *The Born-Einstein Letters 1916–1955: Friendship, Politics and Physics in Uncertain Times* (New York: Mcmillan, 2005)
119. Landau L D, Rumer G B *What is relativity?* (Dover: Basic Books Inc., 1959)
120. Ландау Л Д, Румер Ю Б *Что такое теория относительности* (М.: Изд-во "Советская Россия", 1960, 1963, 1975)
121. Feynman R, Leighton R, Sands M *The Feynman Lectures on Physics* (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1963–1965)
122. Фейнман Р, Лейтон Р, Сэндс М *Фейнмановские лекции по физике* (М.: 1-е изд. — Мир, 1965; 4-е изд. — УРСС, 2004)
123. Feynman R P "The development of the space-time view of quantum electrodynamics", in *Nobel Lectures, Physics 1963–1970* (Amsterdam: Elsevier, 1972) [Фейнман Р "Развитие пространственно-временной трактовки квантовой электродинамики" (Нобелевские лекции по физике — 1965) *УФН* 91 29 (1967)]

The Einstein formula: $E_0 = mc^2$. "Isn't the Lord laughing?"

L.B. Okun

Russian Federation State Scientific Center "A.I. Alikhanov Institute of Theoretical and Experimental Physics",
ul. B. Cheremushkinskaya 25, 117218 Moscow, Russian Federation
Tel. (7-495) 123-31 92, (7-495) 125-96 60
E-mail: okun@itep.ru

The article traces the way Einstein formulated the relation between energy and mass in his work from 1905 to 1955. Einstein emphasized quite often that the mass m of a body is equivalent to its rest energy E_0 . At the same time he frequently resorted to the less clear-cut statement of the equivalence of energy and mass. As a result, Einstein's formula $E_0 = mc^2$ still remains much less known than its popular form, $E = mc^2$, in which E is the total energy equal to the sum of the rest energy and the kinetic energy of a freely moving body. One of the consequences of this is the widespread fallacy that the mass of a body increases when its velocity increases and even that this is an experimental fact. As wrote the playwright A.N. Ostrovsky "Something must exist for people, something so austere, so lofty, so sacrosanct that it would make profaning it unthinkable."

PACS numbers: 01.65. + g, 03.30. + p

Bibliography — 123 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk 178 (5) 541–555 (2008)

DOI: 10.3367/UFN.0178.200805g.0541

Received 21 December 2007, revised 20 March 2008

Physics – Uspekhi 51 (5) (2008)