

В частности, если $P' = 0$, то $m' = m_0$, и

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad P = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Переход от массы покоя к релятивистской массе в теории относительности вызывает, видимо, те же психологические затруднения, что и переход от собственного времени к относительному времени.

Заметим в заключение, что если вместо координат t, x, \dots используются другие координаты — t', x', \dots , то релятивистская масса m и масса покоя m_0 , являющиеся скалярами, будут выражаться формулами

$$mc = u^i P^j g_{ij}, \quad m_0 c = \sqrt{P^i P^j g_{ij}},$$

справедливыми и для искривленного пространства ОТО. Здесь u^i и P^j , g_{ij} — единичный вектор экспериментатора, 4-импульс тела, метрический тензор новых координат. В статье предполагается, что для исходных координат t, x, \dots , $u^i = \delta^i_0$, $g_{00} = 1$, $g_{11} = -1, \dots$

У фотона нет массы-энергии покоя и, соответственно, нет собственной частоты. Но его масса-энергия и частота могут быть измерены экспериментатором, $E = h =$

$= cu^i P^j g_{ij}$, и оказаться равными любой величине в зависимости от скорости экспериментатора.

Я благодарен Г.С. Лапидусу, его внимание помогло улучшить текст статьи.

Список литературы

1. Борн М *Эйнштейновская теория относительности* (М.: Мир, 1964)
2. Фейнман Р П *Характер физических законов* (М.: Мир, 1968)
3. Стрелков С П *Механика* 3-е изд. (М.: Наука, 1975)
4. Окунь Л Б "Понятие массы" *УФН* **158** 512 (1989)
5. Okun L B "The concept of mass" *Phys. Today* **42** (6) 31 (1989)
6. Taylor E F, Wheeler J A *Spacetime Physics* (San Francisco: W.H. Freeman, 1966)
7. Resnick R, Halliday D, Krane K S *Physics* Vol. 1 (New York: Wiley, 1992)
8. Adler C G "Does mass really depend on velocity, dad?" *Am. J. Phys.* **55** 739 (1987)
9. Alonso M, Finn E J *Physics* (New York: Addison-Wesley, 1995)
10. Храпко Р И, Спириг Г Г, Разоренов В М *Механика* (М.: Изд-во МАИ, 1993)
11. Эйнштейн А "Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии", в кн. *Принцип относительности* (М.: ОНТИ, 1935) с. 175

О письме Р.И. Храпко "Что есть масса?"

Л.Б. Окунь

По моему мнению, письмо Р.И. Храпко содержит ряд ложных утверждений. Я разберу их в своем ответе, который построен в виде чередований утверждений Р.И. Храпко (Х) и моих комментариев (О).

Начнем с первого абзаца.

Х: "Зависит ли масса тел от их скорости? Аддитивна ли масса при объединении тел в систему? Сохраняется ли масса изолированной системы? Различные преподаватели физики и специалисты отвечают на эти вопросы по-разному, поскольку имеются разногласия по вопросу определения массы".

О: Автор прав в том, что различные преподаватели отвечают на эти вопросы по-разному. Что касается современных специалистов, то они отвечают на эти вопросы одинаково, когда речь идет об их научной работе: масса от скорости не зависит, она не аддитивна и сохраняется для изолированной системы; при этом разногласий по вопросу определения массы у них нет.

Однако в статьях и книгах, рассчитанных на широкую аудиторию, специалисты не всегда последовательно используют современную научную терминологию и часто обращаются к устаревшим терминам, широко распространенным в начале XX века, когда создавалась теория относительности. В то время ее язык еще не

сформировался, и ее творцы зачастую использовали в своих работах нерелятивистские выражения для физических величин.

Х: "Мы показываем, что при определении массы рационально отдать предпочтение релятивистской массе, зависящей от скорости, перед массой покоя".

О: Согласно современной терминологии оба термина "релятивистская масса" и "масса покоя" являются устаревшими, пользоваться ими не стоит и "рационально отдать предпочтение" просто массе m без всяких прилагательных или иных дополнительных слов. Такая масса определяется соотношением

$$m^2 = \frac{E^2}{c^4} - \frac{\mathbf{p}^2}{c^2}, \quad (1)$$

где E — полная энергия свободного тела, \mathbf{p} — его импульс, а c — скорость света. Такая масса не меняется при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой инерциальной системе. В этом легко убедиться, если использовать для E и \mathbf{p} преобразования Лоренца:

$$E \rightarrow (E' + \mathbf{v}\mathbf{p}')\gamma, \quad (2)$$

$$p_x \rightarrow \left(p'_x + \frac{vE'}{c^2}\right)\gamma, \quad (3)$$

$$p_y \rightarrow p'_y, \quad (4)$$

$$p_z \rightarrow p'_z, \quad (5)$$

где \mathbf{v} — скорость одной системы отсчета относительно другой, $v = |\mathbf{v}|$, $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$; мы, как обычно, предполагаем, что вектор \mathbf{v} направлен по оси x . Таким образом, в отличие от E и \mathbf{p} , которые являются компонентами 4-мерного вектора, масса m является лоренцевым инвариантом.

Физический смысл массы был открыт Эйнштейном, когда в 1905 г. он ввел в физику понятие энергии покоя.

Л.Б. Окунь. Государственный научный центр "Институт теоретической и экспериментальной физики",
117259 Москва, ул. Б. Черемушкинская 25, Российская Федерация
E-mail: okun@heron.itp.ru

Статья поступила 15 ноября 2000 г.

Действительно, из соотношения (1) для покоящегося тела ($\mathbf{p} = 0$) получаем

$$m = \frac{E_0}{c^2}. \quad (6)$$

Таким образом, масса пропорциональна энергии покоя. А если принять за единицу скорости скорость света c , т.е. положить $c = 1$, то масса тела равна его энергии покоя. Именно энергия покоя, "дремлющая" в массивных телах, частично освобождается в химических и особенно ядерных реакциях.

Принцип относительности был сформулирован еще Галилеем на примере корабля: никакими физическими экспериментами внутри корабля невозможно установить, находится ли он в покое или равномерно и прямолинейно движется по отношению к берегу. Теория относительности Эйнштейна добавила к экспериментам Галилея оптические и электродинамические эксперименты, квинтэссенцией которых явилось утверждение, что в природе существует максимально возможная скорость c , равная скорости света в вакууме.

Если к покоящемуся телу применить преобразования Лоренца (2)–(5), то сразу же получим связь энергии и импульса тела с его скоростью:

$$E = mc^2\gamma, \quad (7)$$

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}\gamma = \frac{E}{c^2} \mathbf{v} \quad (8)$$

или

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{p}c^2}{E}. \quad (9)$$

Частицы света фотоны — безмассовые, для них $m = 0$. Тогда из уравнений (1) и (9) следует, что для фотона $v = c$.

Итак, мы дали ответы на два из трех вопросов Р.И. Храпко: масса тела не зависит от его скорости и, поскольку масса есть энергия покоя, а энергия сохраняется, то и масса — сохраняющаяся величина. Остается ответить на вопрос: аддитивна ли масса? Энергия и импульс аддитивны. Суммарная энергия E двух свободных тел равна сумме их энергий

$$E = E_1 + E_2,$$

аналогично

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2.$$

Но тогда

$$m^2 = \frac{(E_1 + E_2)^2}{c^4} - \frac{(\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2}{c^2} \neq (m_1 + m_2)^2. \quad (10)$$

Суммарная масса оказывается зависящей от угла между импульсами \mathbf{p}_1 и \mathbf{p}_2 .

Масса системы двух фотонов, с энергией E у каждого, равна $2E/c^2$, если они летят в противоположные стороны, и равна нулю, если они летят в одну сторону.

Это очень непривычно для человека, впервые сталкивающегося с теорией относительности, но таков факт! Ньютонова механика, где масса аддитивна, не работает при скоростях, сравнимых со скоростью света. Свойство аддитивности массы следует из формул (8) и (10) в

пределе, когда $v \ll c$ и можно пренебречь членами порядка v^2/c^2 по сравнению с единицей.

Итак, для реализации принципа относительности и постоянства скорости света необходимы преобразования Лоренца, а из них следует, что связь между импульсом и скоростью дается формулой (8), а не ньютоновой формулой

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}, \quad (11)$$

которая применима лишь при пренебрежимо малых значениях v^2/c^2 .

Сто лет тому назад формулу (11) попытались по инерции мышления перенести в релятивистскую физику, и так возникло представление о релятивистской массе m_r , которая (в силу уравнения (8)) растет с увеличением энергии и, следовательно, с возрастанием скорости:

$$\mathbf{p} = m_r \mathbf{v}, \quad (12)$$

$$m_r = \frac{E}{c^2}. \quad (13)$$

Р.И. Храпко описывает это во втором абзаце своего письма такими словами:

Х: "Одним из достижений специальной теории относительности явилось утверждение об эквивалентности массы и энергии в том смысле, что масса тела растет вместе с энергией, в частности, вместе с кинетической энергией, и, таким образом, масса зависит от скорости. Это явление недвусмысленно отражено в работах известных физиков".

О: Как видно из формул (8)–(13), рост m_r с энергией является не "достижением специальной теории относительности", а артефактом, возникшим из-за использования нерелятивистской формулы (11) (справедливой лишь при $v/c \ll 1$) вне области ее применимости. Формула $m_r = E/c^2$ неоднократно применялась и к безмассовому фотону, создавая сумбур в головах учащихся: с одной стороны, фотон безмассов, а с другой — у него есть масса. Ситуация еще более запуталась, когда вместо m_r в формуле (13) стали писать m , а обычную массу m стали обозначать m_0 и называть ее массой покоя.

Почему обозначение E_0 разумно? Потому что энергия зависит от системы отсчета, и индекс нуль в этом случае указывает, что это энергия в системе покоя. Почему обозначение m_0 неразумно? Потому что масса не зависит от системы отсчета.

Вносит свою лепту в возникающую путаницу и утверждение об эквивалентности энергии и массы. Действительно, всегда, когда есть масса, есть и отвечающая ей энергия: энергия покоя $E_0 = mc^2$. Однако не всегда, когда есть энергия, есть масса. Масса фотона равна нулю, а энергия его отлична от нуля. Энергии частиц в космических лучах или на современных ускорителях на много порядков превышают их массы (в единицах, где $c = 1$).

В обоснование того, что масса зависит от скорости, Р.И. Храпко приводит цитаты не из научных работ, а из трех книг: М. Борна (1962 г.), Р. Фейнмана (1965 г.) и С. Стрелкова (1975 г.). Каждая из них заслуживает отдельного комментария.

Борн, один из создателей квантовой механики, несомненно, был великим физиком. Но слепое следование авторитетам не может заменить всестороннего логического (и исторического) анализа понятий, которыми оперирует современная физика. А в книге Борна изложе-

ние эйнштейновской динамики основано на непоследовательном ньютоновом определении импульса $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$, не обсуждаются группа Лоренца, 4-вектор энергии импульса и его квадрат и т.д. Совершенно очевидно, что Борн, родившийся в 1882 г., писал книгу, следуя воспоминаниям своей юности, и отразил в ней ту стадию создания теории относительности, которая была характерна для начала XX века.

Большое влияние оказал на многих авторов обзор по теории относительности, написанный в 1920 г. 20-летним Вольфгангом Паули [11]. В этом обзоре он также воспользовался ньютоновским определением импульса и также много страниц посвятил релятивистской массе и эквивалентности энергии и массы. Подобные формулировки можно найти в монографиях, написанных в первой половине XX века многими выдающимися физиками, такими, как В.А. Фок [2] или Р. Толмен [3] и многими другими.

Первым учебником, в котором была от начала до конца проведена идея лоренцевой инвариантности и использована только современная терминология, была вышедшая в 1941 г. *Теория поля* Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица [4].

Выдающуюся роль в формировании современного релятивистского языка сыграл Р. Фейнман, который в 1950-е годы создал релятивистски инвариантную теорию возмущений в квантовой теории поля вообще и в квантовой электродинамике в частности. Сохранение 4-вектора энергии – импульса лежит в основе знаменитой техники фейнмановских диаграмм, или, как их еще иначе называют, фейнмановских графиков. Во всех своих научных работах Фейнман использовал понятие массы, даваемое формулой (1).

Одной из лучших монографий, подробно описавшей технику фейнмановских диаграмм, во всем мире считается *Квантовая электродинамика* А.И. Ахиезера и В.Б. Берестецкого [5], первое издание которой вышло в 1953 г. В ней, конечно, нет релятивистской массы. Нет ее и в монографии Н.Н. Боголюбова и Д.В. Ширкова *Введение в теорию квантованных полей* [6].

Физикам, которые знакомство с теорией относительности начали с *Теории поля* Ландау и Лифшица, или научных статей Фейнмана, или с монографий [5, 6], уже не могла прийти в голову мысль называть массой тела энергию, деленную на c^2 .

Тем не менее в цитате из научно-популярной книги Фейнмана *Характер физических законов*, приведенной Р.И. Храпко, действительно говорится о том, что "двигаясь, тела становятся тяжелее". Более того, как уже было отмечено в моих статьях 1989 г. [7], с. 525 и [8], с. 35 Фейнман положил понятие релятивистской массы в основу глав, посвященных теории относительности в знаменитых *Фейнмановских лекциях по физике* [9]. Это прискорбный факт, частичное объяснение которого, как мне кажется, надо искать в том, что даже величайшие физики, переходя от научной деятельности к просветительской, пытаются приспособиться к сознанию широкого круга читателей, воспитанного на $m = E/c^2$. Другой яркий пример этого парадоксального явления — популярная брошюра Л.Д. Ландау и Ю.Б. Румера *Что такое теория относительности* [10], в которой одна из шести глав посвящена пропаганде массы, растущей с энергией. После этого цитата из учебника С. Стрелкова уже не вызывает удивления.

Следует обратить внимание на то, что все три цитаты Р.И. Храпко относятся ко времени, когда еще не была создана так называемая "стандартная модель" элементарных частиц, когда еще не вошла в науку теория электрослабого взаимодействия и не были открыты W- и Z-бозоны, когда еще не была создана квантовая хромодинамика с ее кварками и глюонами. Прогресс в физике элементарных частиц, или, как ее иначе называют, физике высоких энергий, ставит теорию относительности (наряду с квантовой механикой) на центральное место в нашей картине мира. И поэтому разрыв между научным и научно-популярным изложением теории с каждым годом становится все более нетерпимым. Кроме того, без правильного понимания теории относительности становится невозможным правильное понимание инженерных основ физики высоких энергий, в частности, ускорителей, коллайдеров, детекторов.

Но, конечно, главное изменение связано все-таки с тем, что основным вопросом, к которому вплотную подошла физика, стал вопрос о природе массы как истинно элементарных частиц, таких как лептоны и кварки, так и частиц типа протона и нейтрона, называемых адронами. Этот вопрос тесно связан с поисками так называемых хиггсовых бозонов и со структурой и эволюцией вакуума. Слова о природе массы относятся, разумеется, к инвариантной массе m , определенной в начале моего ответа, а не к релятивистской массе, которая просто представляет собой полную энергию свободной частицы.

Х: "В последнее время обозначился возврат к ньютоновскому мнению, согласно которому масса не меняется при увеличении скорости тела и остается равной массе покоя. Последовательным выразителем этой тенденции является Л.Б. Окунь [4, 5]. Ранее аналогичная точка зрения была высказана в книге [6]"¹.

О: Далее Храпко цитирует мою статью [7].

Х: "Л.Б. Окунь (1989 г.): "Масса, растущая со скоростью, — это по-настоящему непонятно. Масса тела m не меняется при его движении и с точностью до множителя c^2 равна энергии, содержащейся в покоящемся теле. Масса m не зависит от системы отсчета. В конце XX века с понятием массы, зависящей от скорости, пора окончательно распрощаться. Это абсолютно простой вопрос [4]"

О: Действительно, в моих статьях [7, 8] я отстаивал последовательно релятивистскую терминологию, при которой масса тела не меняется с его скоростью и, следовательно, равна для свободного массивного тела обычной ньютоновской массе, но я категорически возражал против термина "масса покоя", так как он является спутником "релятивистской массы", и я не был его "выразителем".

Я не согласен также с тем, что в моих статьях [7, 8] "обозначился возврат к ньютоновскому мнению". Во-первых, современное определение массы, которого я придерживаюсь, годится и для частиц с нулевой массой, которых нет у Ньютона. Во-вторых, как отмечено выше, масса системы двух или большего числа тел не равна в теории относительности сумме масс этих тел. Это радикально отлично от нерелятивистской механики.

¹ Курсивные цифры соответствуют списку литературы (в квадратных скобках) и номерам формул (в круглых скобках) письма Р.И. Храпко.

Письмо Р.И. Храпко направлено против моих статей [7, 8]. Однако аргументы (физические, исторические, педагогические, философские), приведенные в них, он не анализирует и контраргументы не выдвигает. Этот необычный способ вести полемику очень затрудняет разбор письма Р.И. Храпко.

А теперь обратимся к цитате, состоящей из пяти фраз. Первая фраза взята из [7], с. 524, где иронически описывались ощущения некомпетентного читателя. Вот полный текст этого отрывка: "Масса, растущая со скоростью, — это было по-настоящему непонятно и символизировало глубину и величие науки и завораживало воображение. Что по сравнению с ней обычная масса, такая простая, такая понятная!" Ясно, что при таком способе цитирования смысл абсолютно искажается. Аналогичным образом, с помощью ножниц и клея, из третьего, четвертого и пятого абзацев со с. 512 нарезаны и собраны воедино остальные четыре фразы этой невразумительной "цитаты".

Следующая за ней цитата из Тейлора и Уиллера [11] (с. 137) при правильном переводе такова: "Понятие "релятивистской массы" ведет к недоразумениям и потому не используется нами".

Хотя как книга Тейлора и Уиллера [11], так и мои статьи [7, 8] были в равной степени направлены против массы, растущей со скоростью, между нами существовало различие: в [11] масса, определяемая уравнением (1), называлась массой покоя, а в [7, 8] — просто массой. В начале 1990-х годов Тейлор и Уиллер готовили второе издание своей книги, и в процессе этой подготовки мы обменивались письмами. Во втором издании их книги [12] "масса покоя" упоминается лишь один раз. В разделе "Диалог: правильное и неправильное использование понятия массы" на с. 251 мы читаем:

"Вопрос: Нужно ли называть инвариантную массу частицы ее "массой покоя"?"

Ответ: Именно так мы называли ее в первом издании этой книги. Но вдумчивый студент указал, что выражение "масса покоя" ведет к недоразумениям. Что происходит с массой покоя частицы, когда частица движется? В действительности масса — это масса — это масса ("mass is mass is mass"). Масса имеет одну и ту же величину во всех системах отсчета, она инвариантна независимо от того, как движется частица. (Галилей: "В вопросах науки авторитет тысяч стоит меньше, чем скромное рассуждение одного человека".)

Статьи [7, 8] и особенно книга [12] оказали сильное влияние на педагогическую литературу².

Авторы десятков учебников, вышедших в 1990-е годы, выбросили из них массу, растущую со скоростью, заменив ее просто массой.

Первым откликнулся ныне покойный профессор МИФИ Игорь Владимирович Савельев в учебнике [13]. Сняв книгу с полки в связи с написанием этого ответа, я натолкнулся на вложенную в нее записку:

"Глубокоуважаемый Лев Борисович!

Посылаю Вам "анонсированный" учебник для втузов, в котором нет релятивистской массы (см. сноску на с. 175).

По просьбе изд-ва "Наука" я подготовил к очередному (10-му или 11-му) изданию широко используемый во втузах *Сборник задач* Волькенштейна. При этом я

полностью искоренил релятивистскую массу (которой там было посвящено много задач).

Обращаю Ваше внимание, что прилагаемая книга утверждена в качестве учебника и издана массовым тиражом. Таким образом, в основной учебной литературе по физике для втузов теперь релятивистской массы не будет.

Пишу обо всем этом на случай, если у Вас еще сохранился интерес к школьной программе по физике.

И. Савельев"

Перешли к инвариантной массе и Р. Резник с соавторами [14]. Однако переход этот происходит не без трудностей. На с. 166 приводится формула $E_0 = mc^2$, а на с. 167 рассматривается аннигиляция $e^+e^- \rightarrow 2\gamma$, именно здесь авторы утверждают, что "энергия имеет массу", поскольку они неявно предполагают, что масса аддитивна.

Именно для того, чтобы избавиться от подобных "ляпов", необходимо, чтобы в учебной литературе по теории относительности была принята единая современная научная терминология. Параллельное использование современных и давно устаревших обозначений и терминов напоминает о марсианском зонде, который разбился в 1999 г. из-за того, что одна из фирм, участвовавших в его создании, использовала дюймы, в то время как остальные — метрическую систему.

Но вернемся к цитатам Р.И. Храпко. Истории об отце и сыне из статьи Адлера [15] в моей статье [7] я посвятил специальный раздел на с. 527–528: Адлер писал, что понятие релятивистской массы с каждым годом играет все меньшую роль в преподавании физики, и приводил отрывок из частного письма Эйнштейна, в котором тот не рекомендовал вводить релятивистскую массу, а пользоваться только одной массой m . Р.И. Храпко скрыл от читателя эту информацию. Так обстоит дело с цитатами.

Далее Р.И. Храпко рассматривает пригодность ньютоновых формул $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ и $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ для определения (дефиниции) массы. Первую из них он отвергает, вторую принимает. С его первым решением я полностью согласен. Более того, в моих статьях [7, 8] подробно объясняется, почему с формулой $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ нельзя идти в релятивистскую область. Там же (а также в первой части этого письма) объясняется, что в релятивистской области имеет место не формула $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$, а формула $\mathbf{p} = (E/c^2)\mathbf{v}$. Но, следуя за Борном (см. сноску 2 письма Храпко), Храпко сохраняет формулу $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ и приходит к выводу, что $m = E/c^2$. В результате то, что в физике принято называть энергией частицы, он называет (релятивистской) массой частицы, обозначая ее m , и говорит о 4-импульсе, у которого временная компонента не энергия, а масса (он даже пользуется при этом единицами, где $c = 1$); то же, что принято называть массой, он называет массой покоя m_0 .

Если бы Р.И. Храпко строил физику на голом месте, что называется с чистого листа, то он мог бы позволить себе роскошь: вообще не иметь термина "энергия". Но существуют миллионы книг и статей по физике, использующих понятие "энергия". И если все переназывать по Храпко, то что делать со всей этой огромной литературой? Поскольку энергия аддитивна, то и масса у Храпко аддитивна. Это свойство (релятивистской) массы его очень радует.

² Очень жаль, что книга [12] до сих пор не переведена на русский язык.

Но полного счастья от переименования не происходит, поскольку остается масса (в его терминах — масса покоя m_0), которая неаддитивна. Р.И. Храпко выражает свою неудовлетворенность неаддитивностью m_0 в следующих словах:

Х: "Когда физики говорят о красоте как о критерии истины, они, по нашему мнению, не имеют в виду массу покоя."

Дело в том, что закону сохранения подчиняется как релятивистская масса, являющаяся временной компонентой 4-импульса, так и масса покоя, являющаяся его модулем. Это констатируется в [4]. Однако не так просто принять, что сохраняется неаддитивная величина".

О: А в чем сложность?

Х: "Действительно, масса покоя системы, согласно (3), (4), не меняется при столкновениях частиц и ядерных реакциях. Но достаточно мысленно разделить систему двух движущихся тел на два тела, и масса от этого сразу изменится, потому что масса покоя пары тел не равна сумме масс покоя тел пары".

О: Я не понял, что значит мысленно разделить систему двух тел на два тела. В случае двух фотонов они останутся двумя фотонами, как бы мы их мысленно не делили, и масса системы, состоящей из двух фотонов, по определению останется массой этой системы.

Х: "На наш взгляд, использование неаддитивных понятий связано с серьезными интеллектуальными нагрузками: пара фотонов, не имеющих массу покоя, имеет массу покоя".

О: Я не понимаю, почему переименование энергии в массу не вызвало у Р.И. Храпко никаких проблем, а сложение двух 4-векторов и возведение их в квадрат вызывает серьезные интеллектуальные нагрузки?

Х: "Весьма труден вопрос: "Имеет ли энергия массу покоя?"

О: Вопрос этот не имеет смысла. Массу (m_0 по Храпко) имеет не энергия, а тело (частица) или система частиц. Авторы учебника [14], заключив, что из $E_0 = mc^2$ следует, что "энергия имеет массу", написали просто бессмысленную фразу.

Х: "Далее. Летящие в одну сторону фотоны не имеют массу покоя, но излучившее их тело при этом уменьшило свою массу покоя. Напрашивается вывод, что часть массы покоя превратилась в безмассовую энергию фотонов. Однако, согласно (3), (4), масса покоя системы тело-фотоны сохранилась неизменной при излучении!"

О: Пусть исходное покоящееся тело имело массу m_1 . После испускания безмассового фотона с энергией E масса тела стала $m_2 = m_1 - E$ (мы предполагаем, что $E \ll m_1$ и пренебрегаем энергией отдачи тела m_2). Что касается массы всей системы (тело m_2 + фотон), то она осталась равной m_1 . Я не вижу никакой трудности в том, что масса покоя одного тела частично превратилась в кинетическую энергию фотона и что при этом полная энергия сохранилась. Но Храпко видит в этом внутреннее противоречие.

Х: "Не выдержав таких интеллектуальных перегрузок, сторонники массы покоя вопреки определению (3), (4), отказываются от закона сохранения массы покоя системы. Теперь у них "масса покоя системы увеличивается при неупругих соударениях" ([6], с. 121). При ядерных реакциях, наоборот, возникает "дефект массы покоя". Например, при синтезе дейтерия, $p + n =$

$= D + 0,2$ МэВ, масса покоя дейтерия оказывается меньше массы покоя системы".

О: Мне представляется крайне невежливым обвинять публично кого бы то ни было, а тем более таких уважаемых авторов как Уиллер и Тейлор, в том, что они не выдержали интеллектуальных нагрузок. Подзаголовков на с. 121 их книги гласит: "Масса покоя конечной системы возрастает при неупругом столкновении". (Обратите внимание на слово *конечной*, которое отсутствует в цитате Храпко.) Здесь они обсуждают столкновение двух шариков из мастики, один из которых до столкновения двигался с большой кинетической энергией T_1 , а другой покоился. В результате два шарика слипаются в комочек. Применяя законы сохранения энергии и импульса, авторы показывают на с. 122, что масса слипшегося комка превышает сумму масс сталкивающихся шариков:

$$m_{\text{final}}^2 = (m_1 + m_2)^2 + 2T_1m_2.$$

При этом, конечно, массы конечного и начального состояний равны. В этом проще всего убедиться, если рассмотреть столкновение шариков в системе их центра масс, где они движутся навстречу друг другу с равными импульсами. За счет чего масса слипшихся шариков превышает сумму их масс? За счет того, что кинетическая энергия двигавшегося шарика перешла в тепловую энергию слипшегося комка, что и объясняют авторы на с. 121. Разумеется, наблюдать на опыте это увеличение массы практически невозможно, так как оно очень мало. Однако в физике высоких энергий неупругие столкновения, в которых сумма масс частиц в начале реакции не равна сумме масс частиц в конце, — это самое обычное явление. Один из примеров приведен в [11] на с. 122:

$$e^- + e^- = e^- + e^- + e^- + e^+.$$

К сожалению, при переводе книги [11] на русский язык [16] обсуждаемый подзаголовок был переведен неправильно: "Масса покоя конечного состояния при неупругом соударении больше, чем масса покоя начального" (с. 161). Однако из текста видно, что в действительности речь идет не о массе начального состояния, а о сумме масс частиц в начальном состоянии.

Что касается реакции синтеза дейтрона, то ее нет в обсуждаемом разделе книги [11]. Но если бы она была, то правильная запись ее была бы стандартной: $p + n = D + \gamma$, где γ обозначает γ -квант, испускаемый при образовании дейтрона.

Масса системы $p + n$ равна массе системы $D + \gamma$. Но сумма масс $p + n$ превышает сумму масс $D + \gamma$. (Напомним, что фотон безмассов.) Разность $m_p + m_n - m_D$ и называется дефектом массы.

Х: "В то же время, согласно (3), (4), никакого "дефекта" массы покоя при ядерных реакциях вообще нет. В нашем примере недостающую, якобы, массу покоя на стадии $D + 0,2$ МэВ представляет γ -квант с энергией 0,2 МэВ, сам не имеющий массы покоя, так что нарушается аддитивность массы покоя системы."

Нетрудно понять школьника, забросившего физику ввиду такой неразберихи с массой покоя".

О: Школьника, который только приступает к изучению теории относительности, действительно понять нетрудно. Но преподавателя Московского авиационного института, автора учебника "Механика" [17] понять очень трудно: зачем ему необходима аддитивная масса?

Х: "Тем не менее большое количество физиков считает массу покоя главной и обозначает ее m , а не m_0 , а релятивистскую массу дискриминирует и оставляет без обозначения, что вносит дополнительную путаницу, потому что из-за этого порою бывает трудно понять, о какой массе идет речь. Примером является высказывание, цитированное из [7]."

О: Я обозначаю буквой m инвариантную массу, и, обозначив "релятивистскую массу" m_r , а "массу покоя" — m_0 , предлагаю "выбросить их за борт" и забыть, чтобы избавить от неразберихи школьника, мучения которого только вырастут, если, следуя предложению Храпко, энергию переименуют в массу и обозначат буквой m .

Х: "Эти физики соглашаются с тем, что масса покоящегося газа увеличивается при нагревании, поскольку увеличивается содержащаяся в нем энергия, но, видимо, имеется психологический барьер, мешающий попросту объяснить это увеличение ростом массы отдельных молекул вследствие увеличения их тепловой скорости".

О: Храпко опять хочет аддитивной массы: чтобы масса некоторого объема газа была равна сумме масс составляющих его молекул. Суммарная энергия E газа равна сумме энергий всех его молекул. Суммарный импульс \mathbf{p} газа равен сумме импульсов всех его молекул, но инвариантная масса газа $m = \sqrt{E^2 - \mathbf{p}^2}$. Если импульс некоторого объема газа равен нулю, то масса газа равна сумме энергий всех молекул, но не их масс. Это может быть, например, газ безмассовых фотонов, энергия которых при нагревании растет, а скорость остается постоянной. Психологический барьер, о котором говорит Храпко, существует у него: он не может осознать, что масса аддитивна только в нерелятивистском пределе.

Х: "Эти физики жертвуют представлением о массе как мере инертности в пользу ярлыка, прикрепленного к каждой частице с информацией о неизменном "количестве вещества", потому что ярлык соответствует привычному ньютоновскому представлению о массе. Поэтому излучение, которое по Эйнштейну [11] "переносит инерцию", не имеет у них массы".

О: В теории относительности масса не является мерой инерции. От такой роли массы отказался и сам Храпко, когда не стал пользоваться формулой $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$. Мерой инерции является полная энергия тела или системы тел. Никаких ярлыков, тем более соответствующих ньютоновскому представлению о массе, физики к частицам не прикрепляют. Ведь частицами физики считают и безмассовые частицы. Учитывая только что сказанное, нет ничего удивительного в том, что излучение переносит от одного тела к другому энергию, а следовательно, и инерцию.

Х: "Главная психологическая трудность в том, чтобы отождествить массу и энергию (которая изменяется), принять эти две сущности, как одну. Легко принять формулу $E_0 = m_0c^2$ для покоящегося тела. Авторы [6] так и озаглавили раздел 13: "Эквивалентность энергии и массы покоя" [сноска 3: в заголовке — типичная неясность: подразумевается эквивалентность энергии покоя и массы покоя]. Труднее принять справедливость формулы $E = mc^2$ для любой скорости. Замечательная формула $E = mc^2$ представляется Л.Б. Окуню "безобразной" [4].

О: Отождествить массу и энергию можно, только нарушив логику, поскольку масса — релятивистский

скаляр, а энергия — компонента 4-вектора. В разумной терминологии, принятой авторами в следующем издании [12] книги, заголовок в книге [11] должен был звучать: "Эквивалентность энергии покоя и массы".

Я надеюсь, что разъяснил читателю, в каком смысле формула $E = mc^2$ безобразна. Более подробное обсуждение можно найти в статьях [7, 8].

В конце своего письма Храпко вновь повторяет, чем хороша релятивистская масса, которую он обозначает не m_r , а m , и чем плоха обычная масса, которую он называет "массой покоя" и обозначает не m , а m_0 . Затем пишет лоренцевы преобразования, обозначая в них энергию буквой m и частично явно выписывая c , а частично молчаливо полагая $c = 1$. Его заключительные замечания ничего нового в обсуждаемый вопрос не вносят.

В завершение своего ответа я хотел бы сказать, что на заседании редколлегии УФН я был против публикации письма Р.И. Храпко, считая, с одной стороны, что, опубликованное без комментариев, оно принесет большой вред, а с другой стороны, полагая, что из-за своей агрессивной иррациональности оно не является подходящей основой для дискуссии о понятии массы. Хотел бы отметить, что в статьях В.Л. Гинзбурга, по настоянию которого было опубликовано письмо Р.И. Храпко и написан мой ответ, упоминаний о "релятивистской массе" или "эквивалентности энергии и массы" я не нашел.

Список литературы

1. Pauli W *Relativitätstheorie, Encykl. Math. Wiss.* Bd 19. (Leipzig: Teubner, 1921) [Переводы на русский язык: Паули В *Теория относительности* (М.-Л.: Гостехиздат, 1947); (Перевод с немецкого В Л Гинзбурга, Л М Левина) 2-е изд., испр. и доп. по англ. изд. 1958 г. (М.: Наука, 1983)]
2. Фок В А *Теория пространства времени и тяготения* (М.: ГИТТЛ, 1955) с. 104, 105, 144, 145
3. Tolmen R C *Relativity, Thermodynamics and Cosmology* (Oxford: Clarendon Press, 1969) (Первое издание: 1934) [Толмен Р *Относительность, термодинамика и космология* (Пер. с англ. В М Дубовика, В К Игнатовича) (Под ред. Я А Смородинского) (М.: Наука, 1974)]
4. Ландау Л Д, Лифшиц Е М *Теория поля* (М.: Гостехиздат, 1941)
5. Ахизер А И, Берестецкий В Б *Квантовая электродинамика* (М.: ГИТТЛ, 1953) (2-е изд.: Физматгиз, 1959); (3-е изд.: М.: Наука, 1969)
6. Боголюбов Н Н, Ширков Д В *Введение в теорию квантованных полей* (М.: ГИТТЛ, 1957) (2-е изд.: М.: Наука, 1973), (3-е изд.: М.: Наука, 1984)
7. Окунь Л Б *УФН* **158** 512 (1989)
8. Okun L B *Phys. Today* **42** (6) 31 (1989)
9. Feynman R, Leighton R B, Sands M *The Feynman Lectures on Physics* (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1963, 1964) Vol. 1. Ch. / 15, 16; Vol. 2. Ch. 28 [Перевод: Фейнман Р, Лейтон Р Б, Сэндс М *Фейнмановские лекции по физике* (М., 1961–1966) Вып. 2, Гл. 15, 16; Вып. 6, Гл. 28
10. Ландау Л Д, Румер Ю Б *Что такое теория относительности* 3-е изд. (М.: Сов. Россия, 1975)
11. Taylor E F, Wheeler J A *Spacetime Physics* (San Francisco: W.H. Freeman and Co, 1966)
12. Taylor E F, Wheeler J A *Spacetime Physics* (New York: W.H. Freeman and Co, 1992)
13. Савельев И В *Курс общей физики* Т. 1 *Механика. Молекулярная физика* 3-е изд., испр. (М.: Наука, 1986)
14. Resnick R, Halliday D, Krane K S *Physics* Vol. 1 (New York: Wiley, 1992)
15. Adler C *Am. J. Phys.* **55** 739 (1987)
16. Тейлор Э, Уилер Дж. *Физика пространства-времени* 2-е изд. (Перевод с англ. Н В Мицкевича) (М.: Мир, 1971)
17. Храпко Р И, Спирин Г Г, Разоренов В М *Механика* (М.: Изд-во МАИ, 1993)