

1. Введение

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.

Макс Борн (1962): "Масса одного и того же тела есть относительная величина. Она должна иметь различные значения в зависимости от выбора системы отсчета, в которой производится ее измерение, или - при измерении в одной и той же системе отсчета - в зависимости от скорости движущегося тела" ([1], с.324).

Ричард Фейнман (1965): "Из-за эквивалентности массы и энергии энергия связанная с движением, проявляется как дополнительная масса. Двигаясь, тела становятся тяжелее. Ньютон был другого мнения. Он считал, что массы постоянны" [2].

Это явление отражено в учебниках.

С.П. Стрелков (1975): "Зависимость массы от скорости - одно из основных положений механики Эйнштейна" [3].

Однако последнее время это явление отвергается. 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].

Л.Б. Окунь (1989): "Масса, растущая со скоростью, - это по-настоящему непонятно. Масса тела m не меняется при его движении и с точностью до множителя c 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].

Дж.А.Уилер *et al.* (1966): "Концепция релятивистской массы непонятна для объяснения". ([6], с. 137).

К этой точке зрения присоединились авторы некоторых зарубежных учебников для студентов.

Р. Ресник *et al.* (1992): "Статья [5] суммирует взгляды, которых придерживаются многие физики. Эти взгляды используются и в нашей книге, хотя нет общего согласия об интерпретации уравнения Эйнштейна

$$E = mc^2, \quad (35)$$

где E - энергия покоя частицы массы m . Тем не менее из этого уравнения следует, что энергия имеет массу" [7].

Серьезная путаница, которая возникла в связи с возвратом к ньютоновскому мнению относительно массы, отражена в следующем диалоге.

Школьник: "Папа, а масса действительно зависит от скорости?"

Отец, физик: "Нет! Впрочем, да... На самом деле нет, но не говори это своему учителю. На следующий день сын забросил физику" [8].

Мы надеемся в настоящем письме сформулировать рациональный подход к определению массы.

2. *Расщепление определения массы*

Инертная масса имеет два различных определения (дефиниции), которые совпадают при нерелятивистском рассмотрении.

(i) "В бытовом смысле слово масса означает нечто вроде количества вещества. Понятие вещества считается самоочевидным" ([1], с.48). Другими словами, "масса определяется как число, прикрепленное к каждой частице или телу и получаемое сравнением со стандартным телом единичной массы" [9].

(ii) Масса есть мера инертности тела, то есть коэффициент пропорциональности в формуле

$$F = ma \tag{1}$$

или в формуле

$$P = mv. \tag{2}$$

Поскольку для F , a , P и v имеются бесспорные операционные определения, формулы (1) или (2) дают операционные определения массы. С помощью этих формул предполагается производить упомянутое в (i) сравнение для получения прикрепленного к телу числа m .

По поводу операционного определения импульса см. [10]. Приведем здесь выдержку из [10]. "Смысл операционного определения заключается в отождествлении двух английских эквивалентов русского слова «определение»: “definition” и “determination”. Операция по определению импульса заключается в принципе в следующем. Движущаяся частица останавливается с помощью некоторой преграды, и в процессе торможения измеряется сила $F(t)$, с которой частица действует на преграду. Исходный импульс частицы, по определению, равен интегралу $P = \int F(t)dt$. Постулируется, что этот интеграл не зависит от деталей торможения, то есть от вида функции $F(t)$ ".

Однако, число, определяемое по формулам (1), (2) с помощью операционных определений F , a , P , v для одного и того же тела, то есть для одного и того же "количества вещества", как оказывается, зависит от скорости движения тела, а, при наличии скорости, зависит еще и от используемой формулы - (1) или (2). Поэтому для движущегося тела дефиниция массы расщепляется на две.

"Количество вещества", указанное в прикрепленном числе, перестает быть мерой инертности движущегося тела.

а) Для определения "количества вещества" тела, то есть прикрепленного числа из (i), тело надо остановить и после этого применить формулу (1) или (2) на малой скорости. Полученное таким образом число называется массой покоя. Эта масса по определению не меняется при ускорении тела.

б) Если же тело не останавливать предварительно для измерения его массы, то формула (1), как известно, не дает однозначного результата. Поскольку сила и ускорение не являются свойствами тела, коэффициент в формуле (1) зависит от направления силы по отношению к скорости тела. Этот коэффициент вообще становится тензором. Поэтому определение массы формулой (1) совершенно не адекватно действительности. Его не следует даже рассматривать при не малой скорости тела.

с) Напротив, формула (2) справедлива при любой скорости, включая скорость света. Поэтому она, и только она, дает операционное определение массы движущегося тела. Такая масса является мерой инертности для движущегося тела. Она называется релятивистской массой.

Здесь уместно еще процитировать М. Борна: "В физике - и мы должны подчеркнуть это самым решительным образом - слово масса не имеет иного смысла, кроме того, который придает ему формула (2)." ([1] с.48).

И тут возникает проблема. Какую из двух масс, массу покоя из а) или релятивистскую массу из с), назвать простым словом масса, обозначить буквой m без индексов и тем самым признать "главной" массой. Это - не терминологическая проблема. Здесь имеется серьезная психологическая и методологическая подоплека.

Чтобы решить, какая из масс - главная, мы сравним свойства масс. При этом, в предварительном порядке, мы обозначим массу покоя m_0 , а релятивистскую массу обозначим m , поскольку иначе для релятивистской массы вообще не будет простого обозначения.

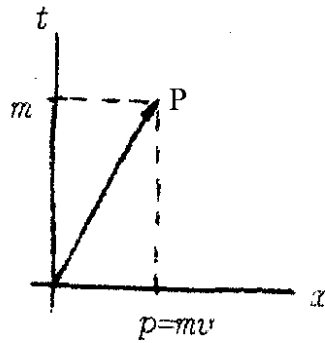
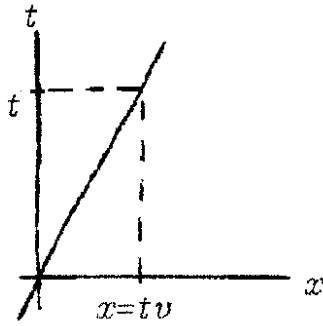
3. Система частиц

Если две частицы с импульсами $\mathbf{P}_1 = m\mathbf{v}_1$ и $\mathbf{P}_2 = m\mathbf{v}_2$ мысленно объединяются в единую систему тел, то, как известно, импульсы частиц складываются: $\mathbf{P} = \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2$. Однако этого мало.

Складываются четырехмерные импульсы: $P = P_1 + P_2$. 4-импульс P , по определению, касателен к мировой линии частицы в пространстве Минковского, и его пространственная компонента равна обычному импульсу \mathbf{P} . Поэтому временная компонента равна релятивистской массе m :

$$P = \{m, \mathbf{P}\}.$$

Это поясняется двумерным рисунком, на котором слева изображена мировая линия, а справа касательный к ней 4-импульс.



Отсюда мгновенно следует, что при объединении частиц в систему их релятивистские массы просто складываются: $m = m_1 + m_2$

Не так обстоит дело с массами покоя. В 4-мерном смысле масса покоя частицы - это модуль ее 4-импульса (с точностью до c):

$$m_0 = \sqrt{m^2 - P^2 / c^2}$$

Поэтому масса покоя пары тел с массами покоя m_{01}, m_{02} равна не сумме $m_{01} + m_{02}$, а сложному выражению, зависящему от импульсов P_1, P_2 [4]:

$$m_0 = \sqrt{\left(\sqrt{m_{01}^2 + P_1^2 / c^2} + \sqrt{m_{02}^2 + P_2^2 / c^2}\right)^2 - (P_1 + P_2)^2 / c^2} \quad (3)$$

Такая же формула для массы покоя приведена в [6] ($c = 1$):

$$M^2 = (E_{system})^2 - (P_{system}^x)^2 - (P_{system}^y)^2 - (P_{system}^z)^2 \quad (4)$$

Согласно формулам (3), (4), масса покоя не аддитивна. Когда физики говорят о красоте как о критерии истины, они, по нашему мнению, не имеют в виду массу покоя.

4. *Насилие над разумом*

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. 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 покоя от этого сразу изменится, потому что масса покоя пары тел не равна сумме масс покоя тел пары. На наш взгляд, использование неаддитивных понятий связано с серьезными интеллектуальными нагрузками. Например, сторонники неаддитивной массы покоя вынуждены утверждать, что пара фотонов, не имеющих массу покоя, имеет массу покоя.

Весьма труден для них вопрос: "Имеет ли энергия массу покоя?" Правильный ответ может быть таким: если это энергия двух фотонов, разлетающихся в разные стороны, она имеет массу

покоя, а если это энергия двух фотонов, летящих в одну сторону, она не имеет массу покоя ([4], с.518). Так что с этим вопросом, как видно, не справились даже авторы учебника [7], которые попросту утверждают, "что энергия имеет массу"

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 этого тела превратилась в безмассовую энергию фотонов. Однако, согласно (3), (4), масса покоя системы тело-фотоны сохранилась неизменной при излучении!

Не выдержав таких интеллектуальных перегрузок, сторонники массы покоя вопреки определению (3), (4), отказываются от закона сохранения массы покоя системы. Они противоречат сами себе! 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, $p + n = D + 0,2 \text{ МэВ}$, масса покоя дейтерия оказывается меньше массы покоя протона и нейтрона.

В то же время, согласно определениям (3), (4), никакого "дефекта" массы покоя при ядерных реакциях вообще нет и быть не может. В нашем примере недостающую, якобы, массу покоя системы на стадии $D + 0,2 \text{ МэВ}$ предоставляет γ -квант с энергией $0,2 \text{ МэВ}$, сам не имеющий массы покоя, так что нарушается аддитивность массы покоя системы, но масса покоя системы сохраняется неизменной.

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

5. Психологическая подоплека

Тем не менее большое количество зрелых 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 порой бывает трудно понять, о какой массе идет речь. Примером является высказывание, цитированное из [7].

Эти физики соглашались с тем, что масса покоящегося газа увеличивается при нагревании, поскольку увеличивается содержащаяся в нем энергия, но психологический барьер мешает им попросту объяснить это увеличение ростом массы отдельных молекул вследствие увеличения их тепловой скорости.

Эти физики жертвуют представлением о массе как мере инертности в пользу ярлыка, прикрепляемого к каждой частице с информацией о неизменном "количестве вещества", потому что ярлык соответствует их привычному ньютоновскому представлению о массе. Они считают,

например, что излучение, которое, согласно Эйнштейну [11], "переносит инерцию между излучающими и поглощающими телами", не имеет массы, поскольку к излучению невозможно прикрепить ярлык.

Главная психологическая трудность заключается 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 Sec.13: "Эквивалентность энергии и массы покоя" (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].

В теории относительности переход от массы покоя к релятивистской массе вызывает, оказывается, такие же психологические проблемы, как переход от собственного времени к относительному времени.

6. Выводы

Итак, релятивистская масса имеет естественное операционное определение, основанное на формуле $\mathbf{P} = m\mathbf{v}$. Она подчиняется закону сохранения и аддитивна. Она эквивалентна энергии и гравитационной массе. Ее следует называть массой и обозначать m .

Масса покоя то ли не сохраняется, то ли не аддитивна. В этом вопросе сторонники массы покоя противоречат сами себе: сначала они утверждают, что масса покоя сохраняется, но не аддитивна, а потом говорят, что она аддитивна, но не сохраняется. Пропагандируя массу покоя, в этом вопросе запутались такие замечательные физики, как Дж.А. Уилер и Л.Б. Окунь. Масса покоя не эквивалентна энергии. Масса покоя не является гравитационной массой. Масса покоя не является мерой инерции тела. Другими словами, масса покоя - это не инертная масса. Ее следует обозначать m_0 и использовать с осторожностью, особенно если речь идет о системе тел, поскольку использование массы покоя может быть связано с насилием над разумом, продиктованным желанием навязать ньютоновское представление о массе. Сторонники массы покоя не в состоянии принять идею релятивистской массы так же, как ранее противники теории относительности не могли принять относительность времени.

Здесь уместно процитировать М. Планка: "Великая научная идея редко внедряется путем постепенного убеждения и обращения своих противников, редко бывает, что Савл становится Павлом. В действительности дело происходит так, что оппоненты постепенно вымирают, а растущее поколение с самого начала осваивается с новой идеей." [12] К сожалению, великая идея релятивистской массы тщательно изолируется от молодежи. Настоящая статья была отклонена

редакциями следующих журналов: *Успехи физических наук*, *Известия вузов. Физика*, *Квант*, *American Journal of Physics*.

Релятивистская масса вместе с импульсом преобразуется как координаты события при переходе в новую инерциальную лабораторию:

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

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

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

Я благодарен академику В.Л. Гинзбургу, Г.С. Лapidусу и В.П. Визгину. Их внимание помогло улучшить текст статьи.

Список литературы

1. Борн М. Эйнштейновская теория относительности. - М.: Мир, 1964.-452 с.
2. Фейнман Р. Характер физических законов. - М.: Мир, 1968. -231 с.
3. Стрелков С. П. Механика. - М.: Наука, 1975. - 633 с.
4. Окунь Л. Б. Понятие массы. // Успехи физических наук. - 1989, т. 158. - с.512-530.
5. Okun L. B. The concept of mass. // Physics Today. - 1989, June. - p.31-36.
6. Taylor E. F., Wheeler J. A. Spacetime Physics. – San Francisco: Freeman, 1966.- 631с.
7. Resnick R., Halliday D., Krane K. S. Physics V.1 - N.Y.: J. Wiley, 1992.-592p.
8. Adler C. G. Does mass really depend on velocity, dad? // American Journal of Physics. - 1987, v. 55.- p.739-743.
9. Alonso M., Finn E. J. Physics. - N.Y.: Addison-Wesley, 1995.-496p.
10. Храпко Р. И., Спиринов Г. Г., Разоренов В. М. Механика. - М.: МАИ, 1993.-79с.
11. Эйнштейн А. Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии. // Принцип относительности. - М.: ОНТИ, 1935.- с.175-178.
12. Планк М. Происхождение и развитие научной идеи.// Единство физической картины мира. - М.: Наука, 1966.- с.188.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Храпко Радий Игоревич, доцент кафедры физики Московского государственного авиационного института (технического университета), к.ф.-м.н.