

Относительная масса

Р. И. Храпко

Московский авиационный институт, Москва, 125993

khrapko_ri@hotmail.com, <http://khrapkori.wmsite.ru>

Дано определение инертной массы и показано её преимущество над массой покоя.

1. Принцип относительности

Специальная теория относительности Эйнштейна покоится, по сути, на простом и естественном *принципе относительности*. Согласно этому принципу, бесполезно и бессмысленно определять "абсолютную скорость движения" некоторой лаборатории внутренними опытами. То есть, только выглянув в окно, можно заметить скорость лаборатории *относительно* других предметов. Согласно этому принципу, все *инерциальные* лаборатории, то есть лаборатории, в которых не зафиксировано ускорение, равноправны. Из этого принципа, в частности, прямо следует, что скорость одного и того же света, локально измеренная разными наблюдателями (которые движутся друг относительно друга) оказывается одинаковой! Разные наблюдатели будут наблюдать разный *цвет* одного и того же света (эффект Доплера), но *скорость* этого света будет для всех одинакова. Математически такая независимость скорости света от скорости движения наблюдателя обеспечивается инвариантностью максвелловского волнового уравнения при правильном переходе из одной инерциальной лаборатории в другую.

Таким образом, теория относительности покоится на (экспериментально доказанной) **абсолютности** скорости света. Но абсолютная скорость света требует, в первую очередь, отказа от естественного закона сложения скоростей, $v = v' + V$, а это нелегко принять (но – неизбежно). Но это только начало. Оказывается, для того, чтобы абсолютная скорость света действительно **наблюдалась** разными наблюдателями, надо чтобы пространственные и временные отрезки между событиями, а также *инерция* объекта, были **относительными**, то есть оказывались разными для этих разных наблюдателей, зависели от их скорости (отсюда и название теории относительности). Это означает отказ от естественного представления об абсолютном пространстве и времени. Это трудно принять. Это не мог вообразить себе даже Ньютон!

Принять зависимость размеров тел и скорости хода часов от скорости движения их наблюдателя – нелегко. Такая зависимость вызывает много кажущихся парадоксов (наиболее знаменит "парадокс близнецов"). Однако внимательное рассмотрение позволяет разрешить все подобные проблемы, потому что существуют общепринятые способы измерения расстояний, длин и отрезков времени. Существуют определения!

Труднее принять относительность инерции, то есть зависимость инерции некоторого конкретного объекта от скорости движения наблюдателя этого объекта. Всем очевидно, например, что кинетическая энергия объекта зависит от скорости наблюдателя, потому что есть определение кинетической энергии. Но нет общепринятого определения инерции! Отсюда возникают проблемы и с понятием *массы* тела, потому что масса интуитивно связана с инерцией и нет общепринятого определения массы тела.

Ради адекватного определения и понимания, что такое масса, следует освободиться от устаревшего представления классиков об инерции и о массе.

2. Количество вещества или отношение силы к ускорению?

Ньютон (1642-1727), в книге *Математические начала натуральной философии*, 1687, пишет, что "масса" – это "количество вещества", "quantity of matter", или даже, что "масса" и "тело" являются синонимами [1]. "Количество вещества" отождествлялось с количеством составлявших его "первичных частиц". При этом, "количество вещества" дистанцировалось от механических свойств. Это хорошо показано, в частности, в [2]. В то же время, эта

концепция массы Ньютона не была связана с какими либо процедурами измерения. Поэтому сейчас нельзя признать эту концепцию научной концепцией, ибо наука требует операционные определения понятий.

Тем не менее, в настоящее время "масса" часто понимается именно как "количество вещества". Так Рош (Roche J.), объясняя понятие "масса", использует высказывание представителя НАСА о том, что "мышечная и костная масса человека уменьшается во время космического полета" [2].

Понятие *инертности* (нежелание ускоряться) как *механического свойства* тела ввел явно Эйлер (1707 – 1783). В 1745 он сравнивает инертность двух тел, сопоставляя силы, необходимые для их ускорения [3]. Таким образом, Эйлеру мы обязаны понятием *инертной массы*, и Эйлер определял инертную массу тела как коэффициент пропорциональности между силой и ускорением в формуле $\mathbf{F} = \mu \mathbf{a}$.

Эйлер не знал, что это определение свойства тела некорректно, поскольку в действительности вектора \mathbf{F} и \mathbf{a} могут иметь разные направления и коэффициент μ в формуле $\mathbf{F} = \mu \mathbf{a}$ является, вообще говоря, тензором. Действительно, если для покоящегося тела обозначить этот коэффициент m_0 (и назвать *массой покоя*), то для тела, движущегося со скоростью \mathbf{v} , получим, используя понятие *импульса* тела \mathbf{p} [4 (9,1)],

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = \frac{m_0 \mathbf{a}}{\sqrt{1-v^2/c^2}} + \frac{m_0 \mathbf{v}(\mathbf{v}\mathbf{a})}{c^2 \sqrt{1-v^2/c^2}^3},$$

$$F^i = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \left(\delta_j^i + \frac{v^i v_j}{c^2 (1-v^2/c^2)} \right) a^j = \mu_j^i a^j, \quad \mu_j^i = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \left(\delta_j^i + \frac{v^i v_j}{c^2 (1-v^2/c^2)} \right). \quad (1)$$

Если сила параллельна скорости тела, то формула (1) дает

$$\mathbf{F} = \frac{m_0 \mathbf{a}}{\sqrt{1-v^2/c^2}^3}, \quad \mu = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}^3}, \quad (2)$$

а если сила перпендикулярна скорости, то

$$\mathbf{F} = \frac{m_0 \mathbf{a}}{\sqrt{1-v^2/c^2}}, \quad \mu = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}. \quad (3)$$

Поэтому коэффициент μ не может выражать *свойство* тела, так как он зависит от внешней силы, которая не является свойством тела. А инертная масса, по идее Эйлера, является свойством тела.

3. Инертная масса m_{in}

Представление Эйлера об *инертности* как о "нежелании ускоряться" следует обобщить до "нежелания изменять состояние своего движения". Другими словами, инертность объекта определяется импульсом силы, который способен, скажем, остановить движущийся объект, то есть определяется импульсом этого объекта \mathbf{p} :

$$\mathbf{p} = \int \mathbf{F} dt = \int d \frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = \frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1-v^2/c^2}}. \quad (4)$$

Поэтому, если приписывать массе инертные свойства, то *инертной массой* m_{in} разумно назвать (скалярный) коэффициент пропорциональности между импульсом и скоростью

$$m_{in} = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}. \quad (5)$$

Так что

$$\mathbf{p} = m_{in} \mathbf{v}. \quad (6)$$

Ввиду зависимости инертной массы от скорости, ее называют также *относительной массой* или *релятивистской массой*.

4. Гравитационная масса m_g

Ускорение \mathbf{a} некоторого объекта в гравитационном поле обычно обозначается \mathbf{g} . Оно определяется законом Ньютона через гравитационную массу m_g :

$$\mathbf{F} = m_g \mathbf{g}. \quad (7)$$

В то же время, согласно [5, (20)], ускорение вертикально падающего объекта равно:

$$a = g(1 - v^2/c^2). \quad (8)$$

Подставляя (8) в (2), получаем значение гравитационной массы для этого случая:

$$F = \frac{m_0 g}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad m_g = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (9)$$

Согласно [5, (15)], ускорение горизонтально летящего объекта (это случай (3))

$$a = g, \quad (10)$$

так что подставляя (10) в (3), получаем для этого случая то же значение гравитационной массы:

$$m_g = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (11)$$

Отметим, что эта формула остается справедливой и для фотона, приобретая вид

$$m_g = hv/c^2. \quad (12)$$

5. Свойства инертной массы m_{in}

1) Инертная масса (5) совпадает с гравитационной массой (11).

2) Согласно Эйнштейну [6], полная энергия объекта E определяется через инертную массу, то есть **принцип эквивалентности массы и энергии справедлив в отношении инертной массы (5)**:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = m_{in} c^2. \quad (13)$$

3) Инертная масса аддитивна и удовлетворяет закону сохранения. Действительно, инертная масса является временной компонентой 4-импульса объекта (см., напр. [7])

$$p^\sigma = \left\{ \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right\} = \{m_{in}, m_{in} \mathbf{v}\}. \quad (14)$$

Поэтому, если два объекта с инертными массами m_{in1} и m_{in2} объединяются мысленно, или сталкиваются реально, инертная масса объединения, m_{in} , равна сумме:

$$m_{in} = m_{in1} + m_{in2} = Const. \quad (15)$$

И эта сумма сохраняется во времени при отсутствии внешнего воздействия.

6. Свойства массы покоя m_0

1) Масса покоя тела не равна гравитационной массе этого тела (11).

2) Масса покоя не эквивалентна энергии (13).

3) Масса покоя не аддитивна. Действительно, масса покоя частицы - это модуль ее 4-импульса (14) (поэтому масса покоя называется *инвариантной* массой; она не зависит от движения наблюдателя и этим походит на "количество вещества"):

$$m_0 = \sqrt{m_{in}^2 - m_{in}^2 v^2/c^2}. \quad (16)$$

Поэтому масса покоя системы пары тел с массами покоя m_{01} , m_{02} равна не сумме $m_{01} + m_{02}$, а сложному выражению,

$$m_0 = \sqrt{\left(\sqrt{m_{01}^2 + p_1^2/c^2} + \sqrt{m_{02}^2 + p_2^2/c^2}\right)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2/c^2}, \quad (17)$$

зависящему от импульсов $\mathbf{p}_1 = \frac{m_{01} \mathbf{v}_1}{\sqrt{1 - v_1^2/c^2}}$, $\mathbf{p}_2 = \frac{m_{02} \mathbf{v}_2}{\sqrt{1 - v_2^2/c^2}}$ [8]

4) Масса покоя не удовлетворяет закону сохранения. Например, при нагревании железного утюга на 200° его масса покоя возрастает на величину $\Delta m_0 / m_0 = 10^{-12}$ (это легко оценить, если учесть, что теплоемкость железа составляет 450 Дж/кг·град) [9]. Однако нет притока массы покоя в утюг при его нагревании.

7. Заключение.

Какую массу, массу покоя m_0 , или инертную массу m_{in} следует называть просто массой m ?

Классик высказался совершенно определенно:

"В физике - и мы должны подчеркнуть это самым решительным образом - слово масса не имеет иного смысла, кроме того, который придает ему формула $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$." (Макс Борн [10] с.48).

Сравнив свойства массы покоя и инертной массы, мы давно присоединились к этому предложению [11].

Список литературы

1. Newton I *Mathematical Principles of Natural Philosophy* 2 vols, vol 1, transl. A Motte and F Cajori (Berkeley, CA: University of California Press 1966) p 1
2. Roche J "What is mass?" *Eur. J. Phys.* **26** 225 (2005). Есть перевод: Дж. Рош "Что такое масса?" <http://www.physics-online.ru/>
3. Euler L De la force de percussion et sa veritable mesure *Mem. Acad. R Sci B-Lett. Berlin* **1745** 24-5 (1745). Euler L *Opera omnia, series secunda* vol 3, ed P Stäckel et al (Berne: Orell Füssli) pp 52, 73 (1967)
4. Ландау Л. Д. и Е. М. Лифшиц, *Теория поля* (М.: Наука, 1973)
5. Храпко Р. И «Гравитационная масса фотонов» *УФН* **185** № 11, 1225 (2015)
6. Эйнштейн А К электродинамике движущихся тел *Принцип относительности* (ОНТИ, 1935) с. 133
7. Эйнштейн А Элементарный вывод эквивалентности массы и энергии *Собрание научных трудов II* (М.: Наука 1966) с.416
8. Taylor E. F., Wheeler J. A. *Spacetime Physics*. (San Francisco: Freeman, 1966)
9. Окунь Л. Б. Понятие массы. *УФН*, **158** 512 (1989)
10. Борн М. *Эйнштейновская теория относительности*. (М.: Мир, 1964)
11. Храпко Р И «Что есть масса?» *УФН* **170** № 12, (2000).

Российская академия наук

Редакция журнала «Успехи физических наук»

119991 Москва, Ленинский проспект д. 53

Тел. (499) 132-62-65. Тел./Факс. (499) 190-42-44, (499) 132-63-48.

E-mail: ufn@ufn.ru

№ **5386/1**

23 июня 2017 г.

Р.И. Храпко

Уважаемый Радий Игоревич!

Ваша статья «Относительная масса» была рассмотрена вместе с поступившим на Вашу статью отзывом независимого рецензента.

Учитывая критический характер отзыва, было принято решение отказаться от публикации Вашей статьи в журнале УФН.

Направляем Вам отзыв на Вашу статью.

Зам. главного редактора
журнала «Успехи физических наук»
академик РАН



О.В. Руденко

Отзыв о статье Р.И. Храпко «Относительная масса»

Статью печатать не следует, поскольку основной и единственный ее вывод уже опубликован автором в статье в УФН в 2000 г. Статья содержит в основном пересказ общеизвестных истин, описанных в стандартных учебниках.

Ответ автора

Уважаемая редакция, это апелляция. Но поскольку тема очень важная, я опубликовал нашу дискуссию: <http://khrapkori.wmsite.ru/ftpgetfile.php?id=144&module=files>

Уважаемый академик О.В. Руденко,

Рецензент абсолютно неправ!

Несмотря на упомянутую публикацию 2000 года, сейчас общеизвестно и пропагандируется совсем противоположное тому, что написано в статьях Храпко. Сейчас торжествует **неприятие** обществом основной идеи теории относительности, идеи зависимости величин от скорости движения, зависимости массы тел и фотонов от скорости движения наблюдателя. В обществе торжествует атавистическое ньютоновское представление о массе, как о количестве материи, которая, конечно, не зависит от скорости (Newton in 1687 in his "Principia" defined mass as the amount of matter).

Вновь публикуется заблуждение Роджера Пенроуза: "Масса материального тела, которая является точной физической мерой количества материи, содержащейся в теле, может быть превращена в чистую энергию (в соответствии со знаменитой формулой Эйнштейна $E = mc^2$)" [Р. Пенроуз *Тени разума*. Москва, 2003, с. 35.]

European Journal of Physics объясняет: «Масса означает материю или тело: масса есть тело. Масса означает тело само по себе, а не свойство тела». Для иллюстрации журнал приводит высказывание представителя НАСА о том, что "мышечная и костная масса уменьшаются во время космического полета". [Roche J. "What is mass?" *European Journal of Physics*. - 2005, v. 26.- p.225-242].

УФН объясняет: "Масса имеет одну и ту же величину во всех системах отсчета, она инвариантна независимо от того, как движется частица. Масса – это масса – это масса ("mass is mass is mass"). [УФН 170 1369].

Публично осуждаются те школьные преподаватели и университетские профессора, которые позволяют себе говорить, что масса тела растёт с ростом его скорости. Настойчиво утверждается, что соотношение $E = mc^2$ неправильно выражает суть теории относительности Эйнштейна [О *движении материи*. Книга посвящена разъяснению различных тонких вопросов преподавания физики. ИЗДАТЕЛЬСТВО «ФИЗМАТЛИТ», 2012]

Формула $E = mc^2$ и концепция массы, растущей со скоростью, называется "идеологической обработкой юношества" (This famous equation and the concept of mass increasing with velocity indoctrinate teenagers) [Energy and Mass in Relativity Theory World Scientific 2009]

Относительная, то есть релятивистская масса квалифицируется как педагогический вирус. [THE CONCEPT OF MASS IN THE EINSTEIN YEAR. arXiv:hep-ph/0602037]

Интересно, что Тейлор и Уиллер оказались устойчивы к этому вирусу. Понятие релятивистской массы оказалось недоступно им: "The concept of 'relativistic mass' is subject to misunderstanding and is not used". [Spacetime Physics Freeman and Company San Francisco]

Вот исчерпывающее современное заклинание, которое рецензент упустил из виду, говоря об "общеизвестных истинах": "Понятие релятивистской массы, которая растёт со скоростью, несовместима со стандартом языка теории относительности и препятствует пониманию и изучению теории новичками. Такая же трудность возникает и в отношении массы покоя. Чтобы избавиться от релятивистской массы и массы покоя целесообразно

заменить уравнение $E = mc^2$ истинным уравнением Эйнштейна $E_0 = mc^2$, где E_0 - энергия покоя и m – масса". [*Am. J. Phys.* **77**, May 2009, 430].

Распространено образное сравнение: "Релятивистская масса - **шаловой термин** физики времён становления теории относительности, "детская болезнь" – молочные зубы выпадают, вырастают нормальные долговременные". [Цитировано по *Материалы Международной школы-семинара*. 2014 <http://khrapori.wmsite.ru/ftpgetfile.php?id=124&module=files>].

Рост массы со скоростью квалифицируется как широко распространенное заблуждение. [*УФН* **178**, 541].

Понятие **инертной массы** тщательно замалчивается даже теми отважными профессорами, которые решаются писать: "Масса тела не остается постоянной (как предполагается в ньютоновской механике), а изменяется со скоростью" [И.В. Савельев *Курс общей физики* т. 1, 2007]. Чтобы избежать понятия инертной массы, её называют энергией, обозначают e , вместо m , и записывают знаменитую формулу Эйнштейна в виде $E = ec^2$ [*УФН* **178** 653–663 (2008)]

Предлагаемая с 10 августа 2015 года статья Храпко "Относительная масса" показывает явное преимущество понятия инертной массы, над массой, которая не меняется со скоростью. Статья объясняет и устраняет традиционную путаницу, возникшую из-за определенного непонимания сути теории относительности.

Ваш Р.И. Храпко

Уважаемая редакция, кроме апелляции, у меня к вам претензия.

По-видимому, мою статью "Относительная масса" рецензировал тот рецензент, который опозорился на статью "Dependence of acceleration on speed in the Galileo experiment". Вы помните его лаконичный стиль

"ОТЗЫВ

на статью Р.И. Храпко «Зависимость ускорения от скорости в опыте Галилея»
В заметке обсуждается одно свойство движения во внешнем гравитационном поле в общей теории относительности и в ускоренной системе отсчета.
Подобного рода **вопросы подробно освещены в учебниках**.
Считаю, что данная методическая заметка не представляет интереса для читателей УФН".

После этого статья была опубликована в *Eur. J. Phys.* **36**, 038001 (2015) после рецензии "Referee comments on

Dependence of acceleration on speed in the Galileo experiment

by Radi Khrapko

2014 December 19

In this manuscript the vertical fall of a particle is studied within general relativity and the Schwarzschild metric. The author confirms Galileo's finding that the acceleration does not depend on the mass of the particle. The dependence of the acceleration on speed is also calculated.

I have done searches of the web and some textbooks but I have not found a study of this problem, so a publication would have some interest".

Теперь этот рецензент написал практически то же самое

"Отзыв

о статье Р.И. Храпко «Относительная масса»

Статью печатать не следует, поскольку основной и единственный ее вывод уже опубликован автором в статье в УФН в 2000 г. Статья содержит в основном пересказ **общеизвестных истин, описанных в стандартных учебниках"**.