

## Еще раз о “релятивистской массе”

Г.А. Розман

Псковский государственный педагогический институт

В статье обсуждается смысл массы в теории относительности и критикуется широко используемое понятие “релятивистская масса”.

Методические приемы, используемые при изложении физики, не должны искажать ее содержание. Это бесспорное утверждение десятилетиями нарушается при изложении вопроса о массе в специальной теории относительности (СТО). Речь идет о так называемой “релятивистской массе” (РМ), с помощью которой некоторым выражениям придается “классический вид”, но которая, как будет показано ниже, **не имеет никакого физического смысла**. Поэтому неправомерно широко распространенное утверждение, что в СТО масса будто бы зависит от скорости тела в данной инерциальной системе отсчета (ИСО).

Покажем сначала элементарными рассуждениями внутреннюю противоречивость понятия РМ. Рассмотрим два мысленных эксперимента с одним и тем же телом. Пусть тело движется со скоростью  $v$  относительно ИСО “L”. В этой ИСО, согласно определению РМ, тело обладает массой – релятивистской массой

$$m_{\text{рел}} = m \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

Никакого физического объяснения изменению массы не дается. Утверждается, что возрастание массы есть следствие того, что масса в СТО перестала быть абсолютной величиной и, подобно длине, длительности принимает разные числовые значения в зависимости от скорости движения тела. Относительность массы рассматривается в этом опыте как **чисто кинематический эффект**, определяющийся выбором ИСО.

Однако рассмотрим теперь другую ситуацию. Пусть то же тело в той же ИСО разгоняется из состояния покоя до скорости  $v$ . Для этого, очевидно, необходимо совершить работу, затратить энергию. Возрастание массы тела в данном случае есть **чисто динамический эффект**. Резонно поставить вопрос: так что же на самом деле происходит с телом при возрастании его массы по формуле (1)?

Чтобы ответить на поставленный вопрос, выясним, как было введено в СТО понятие “релятивистская масса”.

Осмысление результатов СТО невозможно без учета того нового, что дало установление в СТО неразрывной связи пространства и времени, без учета 4 - мерности мира. Поэтому покажем, как определяются компоненты 4 - вектора скорости в СТО:

$$V_i = \frac{dx_i}{d\tau}, \quad (2)$$

где  $i = 1, 2, 3, 4$ , а  $d\tau$  – интервал собственного времени.

Воспользуемся связью интервалов собственного и лабораторного времени:

$$dt = d\tau \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где  $v$  - модуль скорости относительного движения двух ИСО, лабораторной “L” и ИСО “L’”, связанной с движущимся телом. Подстановка формулы (3) в (2) позволяет получить для компонент 4 - вектора скорости следующее выражение:

$$V_i = v_i \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad \text{где } v_i = \frac{dx_i}{dt}. \quad (4)$$

Обратим внимание на то, что в формуле (4) появился множитель

$\gamma = \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}}$  – релятивистский коэффициент, наличие которого указывает на

релятивистское содержание данного выражения.

Умножая все компоненты 4-вектора скорости на один и тот же множитель -инвариантную массу тела  $m$ , получим компоненты релятивистского 4 - мерного вектора импульса:

$$P_i = mV_i = \gamma m v_i. \quad (5)$$

Именно с помощью этого выражения (5) когда-то и была введена “релятивистская масса”  $m_{\text{рел}} = \gamma m$ . Сделано это было лишь из желания придать выражению (5) классический вид:  $P_i = m_{\text{рел}} \cdot v_i$ . Так появилась формула  $m_{\text{рел}} = \gamma m$ , содержание которой **необъяснимо** с физической точки зрения. Из предыдущего ясно, что коэффициент  $\gamma$  не имеет никакого отношения к массе и присоединен к ней из чисто формальных соображений.

$E_0 = mc^2$

Таким образом, мы установили, что никакой физической величины, называемой “релятивистской массой”, в СТО **не существует**, масса не зависит от скорости движения тела. В СТО используется лишь одна масса - масса тела, она инвариантна, и к тому же имеет то же числовое значение, что и масса в классической физике. Вместе с тем, на основании формулы Эйнштейна в СТО устанавливается, что **масса является мерой энергии тела** в состоянии покоя. Это принципиально новый результат СТО, которого не знала классическая физика: покоящееся тело только из факта своего существования обладает энергией – энергией покоя  $E_0$ . Эксперимент (ядерная энергетика, физика элементарных частиц) подтверждает правильность формулы Эйнштейна.

Если тело движется со скоростью  $v$  относительно ИСО “L”, то помимо энергии покоя  $E_0 = mc^2$ , оно обладает и кинетической энергией. Используя четвертую компоненту 4 - вектора импульса  $P_4$ , можно получить следующую формулу (тоже называемую формулой Эйнштейна) для энергии движущегося тела:

$$E = \gamma mc^2, \quad (6)$$

которая при  $v=0$  переходит в формулу для энергии тела в покое  $E_0 = mc^2$ .

До сих пор мы говорили о массе и энергии частиц и тел, образующих вещество и называемые иногда массивными. Но в природе существуют частицы и другого сорта - так называемые истинно релятивистские (или как будет показано ниже безмассовые) - например, фотоны, а также гипотетические (не обнаруженные еще экспериментально) гравитоны, которые всегда движутся в вакууме с предельной скоростью  $c$ . Для выяснения свойств таких частиц получим некоторые новые выражения. Исключим из формул (5) и (6) величину  $\gamma m$ , тогда

$$(7)$$

Применим формулу (7) к релятивистским частицам, движущимся со скоростью света в вакууме, т.е. положим  $v = c$ . Тогда из формулы (7) получаем:

$$E = pc. \quad (8)$$

Выражение (8) устанавливает важное соотношение между энергией и импульсом релятивистских частиц. Если же из формул (5) и (6) удалить величину  $\gamma m$ , то получим еще одну очень важную формулу СТО, устанавливающую связь между энергией, массой и импульсом любой физической частицы или тела:

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2, \quad (9)$$

в частности, при  $p=0$  мы снова получаем формулу Эйнштейна для энергии тела в покое, формулу  $E_0 = mc^2$ . Разрешим равенство (9) относительно массы тела (или частицы):

$$m^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2. \quad (10)$$

Если в равенство (10) подставить энергию релятивистской частицы (8), то правая сторона равенства (10) становится равной нулю. Отсюда непосредственно следует, что истинно релятивистская частица (например фотон) имеет нулевую массу, фотон – безмассовая частица. А так как масса выступает как мера инерционных свойств, то, следовательно, фотон без инерционен, он не может ни ускоряться, ни замедляться. И в любой ИСО он движется в вакууме с одной и той же предельной скоростью.

Изменение понятия “МАССА” в СТО, наличие безмассовых, релятивистских частиц и упомянутый выше парадокс приводят к тому, что в СТО **не выполняется** классический закон – **закон сохранения массы**. Покажем это. Воспользуемся выражением (10) для рассмотрения массы системы частиц идеального газа:

$$M^2 c^2 = E^2 / c^2 - p^2, \quad (11)$$

где  $M$  – масса частиц идеального газа,  $E$  – их суммарная полная энергия,  $\vec{p}$  – суммарный импульс всех частиц идеального газа. Выберем такую ИСО, чтобы полный импульс всех частиц равнялся нулю. Тогда из формулы (11) следует:

$$M = \dots \tag{12}$$

Каждая из частиц идеального газа обладает массой  $m_k$  и полной энергией  $E_k$ , где первое слагаемое – энергия покоя отдельных частиц, второе – их кинетическая энергия; в силу аддитивности энергии  $\sum_k E_k^{кин} = E^{кин}$ . Выражение (12) можно записать так:

$$\tag{13}$$

Соотношение (13) утверждает, что масса системы частиц идеального газа больше суммы масс частиц этой системы  $\left(\frac{E^{кин}}{c^2} > 0\right)$ , отсюда заключаем, что **закон сохранения массы для частиц идеального газа в СТО не выполняется.**

Усложним задачу и рассмотрим устойчивую систему взаимодействующих частиц (ядро, жидкость, твердое тело и т.д.). В этом случае в формулу (12) необходимо подставить другое выражение для энергии частицы:

$$E_k = m_k c^2 + E_k^{кин} + \sum_{k \neq i} E_{ki}^{nom}, \tag{14}$$

где  $\sum_{k \neq i} E_{ki}^{nom}$  - суммарная потенциальная энергия взаимодействия  $k$  частицы со всеми остальными частицами системы.

Формула (12) после проведения суммирования энергий всех частиц принимает вид:

$$\frac{\sum_k E_k}{c^2} = \sum_k m_k + \frac{E_k^{кин}}{c^2} + \dots$$

$$M = \sum_k m_k + \frac{E^{кин}}{c^2} + \frac{E^{nom}}{c^2}, \tag{15}$$

где  $E^{кин}$  – суммарная кинетическая энергия частиц системы,  $E^{nom}$  – их полная потенциальная энергия парных взаимодействий.

Так как частицы образуют устойчивую систему, то можно считать, что  $E^{кин} \ll E^{nom}$  и пренебречь вторым слагаемым в формуле (15). Кроме того, в устойчивой системе  $E^{nom} < 0$ . Поэтому формула (15) запишется так:

$$M = \sum_k m_k - \frac{E^{nom}}{c^2}, \tag{16}$$

т.е. **масса устойчивой системы частиц меньше суммы масс частиц этой системы.**

Таким образом, и в этом случае **закон сохранения массы**, который является одним из главных законов в классической физике, **в СТО не выполняется.** Величина

$$\Delta m = \sum_k m_k - M \tag{17}$$

называется **дефектом массы**. Она определяет энергию связи частиц системы:

(18)

Формула (18) находит важное применение в ядерной энергетике и физике элементарных частиц. **Таким образом, в СТО нет закона сохранения массы.**

В связи с завидным упорством, которое проявляют сторонники РМ, имеет смысл напомнить историю ее появления в физике [4]. Как ни покажется удивительным многим из нас, понятие РМ было введено в нашу науку еще за несколько лет до создания СТО А. Эйнштейном в 1905 году. Идея зависимости массы электрона от скорости его движения была высказана В. Кауфманом в 1898 г. Им были поставлены опыты по отклонению катодных лучей в магнитном поле. В теоретических расчетах В. Кауфман, естественно, пользовался классическими выражениями для импульса и кинетической энергии электрона. Математические выкладки приводили к формуле, из которой следовало, что удельный заряд электрона зависит от скорости его движения. А так как еще М. Фарадей (1834 г.) сформулировал закон сохранения электрического заряда, то Кауфман предположил, что от скорости зависит масса электрона.

В то же время (1899 г.) знаменитый голландский физик Г. Лоренц, используя формулу 2-го закона Ньютона, вводит для электрона “продольную” и “поперечную” массы (названия связаны с ориентацией векторов скорости электрона и действующей на него силы). Обе массы оказались зависящими от скорости движения частицы, но по-разному и не так (у продольной массы), какую зависимость вводил Кауфман.

В 1900 г. А. Пуанкаре, используя ньютоновскую формулу для количества движения, ввел в употребление электромагнитную массу, характеризующую инертные свойства электромагнитной волны  $m_{\text{электромагнитная}} = E/c^2$ . Так в физике появились три вида масс: “продольная”, “поперечная” и “релятивистская” (“электромагнитная”). Для отличия этих масс от ньютоновской, у последней появился индекс “0” :  $m_0$ .

Несмотря на то, что скоро мы будем отмечать столетие создания СТО, продолжается и физическое, и философское, и методическое осмысление и очищение ее от ненужных понятий и толкований. Почти 60 лет в литературе по СТО повторялось (вслед за Эйнштейном) утверждение, что движущийся шар будет иметь форму эллипсоида вращения с короткой осью в направлении движения. И только в конце 50-х гг было показано, что шар будет виден также в виде шара. Не пора ли и в отношении “релятивистской массы” навести порядок (причем к ней сам Эйнштейн никакого отношения не имеет). При рассмотрении вопроса “о зависимости массы от скорости” необходимо слово “масса” заменить на слово “импульс”, так как именно импульс зависит от скорости, но не линейно, как в классической физике, а по закону  $p = \gamma m V$ . Естественно, следует отказаться от решения задач, связанных с мифической релятивистской массой, перефразировав содержание таких задач относительно импульса.

Зная, что не существует физического понятия “релятивистская масса”, безусловно не следует продолжать использовать это понятие и, что самое главное, **искажать содержание специальной теории относительности.**

## Литература

1. *Эйнштейн А.* Сущность теории относительности М., ИЛ, 1955 г., С. 40-44.
2. *Угаров В.А.* Специальная теория относительности М., Наука, 1977 г., §§ 5.6, 7.6, 8.5. Дополнение 4.
3. *Пустильник И.Г., Угаров В.А.* СТО в средней школе (Пособие для учителей). М., Просвещение, 1975 г., §§ 8, 9, 10.
4. *Окунь Л.Б.* Понятие массы (масса, энергия, относительность). “Успехи физических наук”, 1989 г., Т. 158, вып. 3, С. 511-529.