

К ПОНЯТИЮ МАССЫ В РЕЛЯТИВИСТСКОЙ МЕХАНИКЕ

С.Р. Сырцов

Как ни странно, но даже в настоящее время вопрос о том, зависит ли масса тела от его скорости, вызывает у большинства студентов высших учебных заведений (да и немалой части преподавателей и научных сотрудников, непосредственно не связанных с исследованиями в области физики высоких энергий) недоумение. Ведь среди множества формул, заучиваемых ими в процессе прослушивания соответствующих курсов общей и теоретической физики, формулы

$$E = mc^2 \quad (1)$$

$$m = M / \sqrt{1 - \beta^2} = \gamma M \quad (2)$$

(где $\beta = v/c$; v – скорость тела; c – скорость света; M – «масса покоя») занимают особое место – их помнят практически все выпускники технических и педагогических вузов. А утверждение о том, что тела не могут быть ускорены до скорости света из-за стремления их массы к бесконечности, воспроизводится в громадном числе учебной и научно-популярной литературы [1] и для большинства является очевидным. В то же время во всех современных курсах теоретической физики [2,3] и научных публикациях, связанных с исследованиями явлений, протекающих с быстро движущимися частицами (физика элементарных частиц и т.п.), вопрос этот изложен предельно ясно – масса тела M есть величина инвариантная, т.е. не зависит от системы отсчета. Таким образом, параллельно существуют два подхода к определению понятия массы частиц в релятивистской механике (отражающиеся в соответствующей терминологии) – один для профессионалов, другой, упрощенный, для всех остальных. При этом считается, что второй подход более нагляден и иллюстративен и является более доступным для восприятия обучающихся.

В данной работе мы попытаемся доказать ошибочность такой точки зрения и показать, что различие в двух подходах носит не терминологический характер, а имеет более глубокую природу.

Хорошо известно, что понятие «масса» было введено в механику И.Ньютоном в определении импульса (количества движения) – импульс \vec{p} пропорционален скорости свободного движения тела:

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad (3)$$

где коэффициент m (масса) есть постоянная для данного тела величина.

Определяемая таким образом масса тела является мерой его инертности, обладает свойствами аддитивности (масса составного тела равна сумме масс составляющих его тел) и инвариантна относительно преобразований Галилея, т.е. не меняется при переходе от одной системы отсчета к другой.

Введение эйнштейновского принципа относительности и учет существования в природе предельной скорости распространения сигнала ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с) потребовало изменения взгляда на такие фундаментальные понятия как пространство, время, одновременность. В частности, промежуток времени t между двумя событиями в лабораторной системе отсчета (л.с.о.) связан с собственным временем t_0 соотношением $t = \gamma t_0$

В то же время r и t ведут себя как компоненты вектора в четырехмерном пространстве времени Минковского [3]. Неизменной, инвариантной относительно преобразований Лоренца остается при этом лишь величина s , называемая интервалом: $s^2 = c^2 t^2 - \vec{r}^2$. Подобно координатам (t, \vec{r}) , в релятивистской теории энергия E и импульс \vec{p} частицы (системы частиц) являются компонентами одного 4-вектора $(E/c, \vec{p})$ энергии-импульса. Компоненты этого вектора меняются при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой согласно

преобразованиям Лоренца. Модуль же этого четырехмерного вектора представляет собой инвариант

$$E^2 - \vec{p}^2 c^2 = M^2 c^4 = \text{invar} \quad (4)$$

Импульс частицы \vec{p} определяется выражением

$$\vec{p} = E\vec{v}/c^2 \quad (5)$$

Формулы (4)-(5) являются основными соотношениями теории относительности для свободно движущихся частиц (системы частиц, тела). Замечательной особенностью этих соотношений является то, что они непротиворечивым образом описывают движение частиц во всем интервале скоростей $0 \leq v \leq c$. В частности, при $v=c$ из них следует соотношение $E=pc$ и $M=0$, т.е. частица может двигаться со скоростью света лишь если ее масса равна нулю (фотон). Для частиц с ненулевой массой $M \neq 0$ из (4)-(5) следуют известные соотношения, связывающие энергию и импульс со скоростью

$$E = \gamma M c^2 \quad (6) \qquad p = \gamma M v \quad (7)$$

Роль и место физической величины M , именуемой в этих соотношениях термином «масса частицы», предельно ясна – это постоянная, инвариантная относительно преобразований Лоренца, величина, одинаковая для всех скоростей, положений и моментов времени. Важнейшим следствием уравнений (4)-(5) является и то, что даже покоящееся тело ($v=0$) обладает энергией («энергией покоя») пропорциональной своей массе

$$E_0 = M c^2 \quad (8)$$

Таким образом, согласно теории относительности, масса тела является мерой энергии, заключенной в покоящемся теле [6].

К сожалению, как уже отмечалось, в большинстве учебной и научно-популярной литературы продолжает господствовать другая интерпретация основных формул ТО, основанная на введении зависящей от скорости («релятивистской») массы $m(v)$, и запись формул (6) – (7) в виде

$$E = m(v) c^2 \quad (9) \qquad \text{и} \qquad p = m(v) v \quad (10)$$

Исторические предпосылки возникновения такой ситуации хорошо проанализированы в обзоре [4] и связаны с особенностями создания и становления ТО. Известно, что многие формулы ТО (как и преобразования Лоренца) были получены еще до ее создания в 1905 году Эйнштейном. Потому, даже после ее создания казалось возможным распространить основные понятия ньютоновской механики (масса, импульс, инертность и т.д.) на область скоростей, близких к скорости света, не меняя кардинально их смысл. Тем более, что формулы (9) – (10) «давали» для этого все основания. Действительно, кажется естественным распространить ньютоновское определение импульса (3) на релятивистскую область, связав лоренцевый множитель γ с массой, которая теперь становится зависящей от скорости, и продолжать считать ее мерой инертности уже с учетом этого обстоятельства. Некорректность такого подхода была осознана достаточно быстро. Как несложно показать [4], в отличие от нерелятивистского случая, ускорение в релятивистской динамике не совпадает по направлению с приложенной силой \vec{F} . Поэтому попытка определить инертную массу как отношение $m = |\vec{F}|/|\vec{a}|$ наталкивается на серьезные трудности – «масса», определенная таким образом, становится свойством не только самого тела, но и наблюдателя (через скорость \vec{v}), и источника силы (через угол между \vec{v} и \vec{F}).

Таким образом, масса релятивистской частицы не является мерой ее инертности. В то же время и в ТО масса тела продолжает играть ключевую роль, определяя механику тела в системе отсчета, где оно движется медленно (или покоится), а

равная нулю масса означает, что тело должно двигаться со скоростью света. Связь энергии с «релятивистской массой», задаваемая формулой (6), и следующая из нее «эквивалентность» энергии и массы также не отражает физической сущности ТО. Энергия – всего лишь временная компонента 4-вектора энергии импульса, тогда как масса определяется как полная абсолютная величина этого 4-вектора. Временная компонента 4-вектора совпадает с его абсолютной величиной лишь в частном случае, когда пространственные компоненты этого вектора (т.е. импульс частицы \vec{p}) равны нулю. Только тогда величина энергии становится эквивалентной массе частицы, т.е. верно соотношение (9). Оно является ключевым в ТО, а заодно и самой знаменитой формулой физики, имеющей огромное практическое значение.

Введение же терминов «релятивистская масса» и «масса покоя» не только излишня, но и вредна для правильного понимания происходящих процессов. При их использовании возникает иллюзия того, что увеличение энергии частицы при росте ее скорости связано с какими-то изменениями во внутренней структуре этой частицы. На самом же деле увеличение энергии с ростом скорости заложено в геометрических свойствах самого пространства (преобразования Лоренца!) [5,7]. Не трудно показать, что применение к покоящемуся телу ($E=E_0$, $\vec{p}=0$) преобразований Лоренца автоматически приводит к соотношениям (9) – (10), связывающим энергию и импульс тела с его скоростью. В системе отсчета, связанной с движущимся телом (т.е. по «собственным» часам частицы), заданная сила всегда производит одинаковый эффект за одинаковые промежутки времени. С точки зрения наблюдателя в л.с.о., время действия силы на движущуюся частицу увеличивается и, следовательно, по мере увеличения скорости частицы требуется все больший временной интервал для ее изменения на заданную величину. Это и воспринимается наблюдателем в л.с.о. как увеличение сопротивления движению. Никакого изменения внутренней структуры тела (и определяемой этой структурой величины массы) при этом, конечно же, не происходит.

Очевидно, что искаженные представления о сути явления рано или поздно должны приводить к ошибочным результатам в каких-нибудь нестандартных ситуациях. Вера в то, что величина $m(v)$ является универсальной мерой инертности, а учета зависимости массы от скорости достаточно для решения широкого круга задач релятивистской динамики, рушится достаточно быстро. Многолетний опыт общения автора со студентами и школьниками старших классов показывает, что даже простейшие задачи типа: «Через какое время постоянная сила F сообщит покоящемуся телу скорость v ?» являются для них непреодолимо сложными. Вооруженные понятием о релятивистской массе, они смело интегрируют уравнение

$M / \sqrt{1 - (v/c)^2} \frac{\partial v}{\partial t} = F$ и, получив зависимость $v(t) = c \sin(Ft/Mc)$ с удивлением

обнаруживают, что через время $t = \pi Mc / 2F$ скорость тела достигает скорости света! Последующее объяснение очевидной ошибочности такого решения и нахождение верного ответа $t = Mv / F \sqrt{1 - (v/c)^2}$ правильным способом с использованием формул (4) – (5) является лучшим способом убедить учащихся в необходимости навсегда забыть о релятивистской или какой-либо другой массе, кроме истинной массы M , эквивалентной ее энергии покоя E_0 .

Масса любой элементарной частицы является ее фундаментальной характеристикой. У частицы невозможно «отковырнуть» кусочек массы – энергия, соответствующая массе, может быть превращена в другие виды энергии (например, в излучение) только целиком. Для стабильных или долгоживущих частиц массу определяют путем измерения энергии и импульса и применения формул (4) – (5). Массы короткоживущих частиц определяются путем измерения энергии и импульсов частиц, возникающих при их распаде или «присутствующих» при их рождении.

Заметим, что хотя для простоты мы ограничивались выше рассмотрением динамики одной частицы, приведенные соотношения в равной степени применимы и к любому сложному телу (системе), причем под M надо понимать массу всего

тела. В релятивистском случае масса системы частиц определяется не только и не столько их числом, сколько их энергией и взаимной ориентацией импульсов. Как и в ньютоновской механике, в ТО масса изолированной системы сохраняется со временем, но свойством аддитивности не обладает. В ряде простейших случаев масса системы складывается из масс составляющих систему частиц и масс, обязанных своим происхождением кинетической энергии и энергии взаимодействия частиц системы. Поэтому она может быть как больше, так и меньше суммы масс составляющих ее частиц. Однако для системы любой сложности величина M , именуемая «массой системы», является Лоренц-инвариантом и не меняется при переходе от одной системы отсчета к другой. Именно неаддитивность массы является очень необычной вещью, привносимой ТО. Действительно, например, трудно представить, что система безмассовых частиц (фотонов) имеет не равную нулю массу; или, что поглощение фотонов приводит к увеличению массы тела. Как отмечается в [8]: «...Это очень непривычно для человека, впервые сталкивающегося с теорией относительности, но таков факт!».

То, что введение зависящей от скорости массы не отвечает четырехмерно-симметричной форме ТО и ведет к многочисленным недоразумениям, известно давно. Да и сам Эйнштейн отмечал [7], что «...нехорошо вводить понятие массы тела $m = \gamma M$, для которого нельзя дать ясного определения». После выхода замечательного обзора [4] казалось, что в данный вопрос внесена полная ясность. К сожалению, анализ современной научно-популярной и учебно-методической литературы свидетельствует об ином. Если в вузовской литературе ситуация хотя и медленно, но меняется [8], то в школьной и научно-популярной (за редким исключением [9, 10]) эти перемены гораздо меньше – устаревшая терминология продолжает широко применяться. А задачи типа: «При какой скорости масса электрона увеличивается вдвое?» в обязательном порядке используются для «закрепления» пройденного материала, а также на вступительных экзаменах и в тестах.

Прогресс в физике высоких энергий поставил ТО на центральное место в современной картине мира. Поэтому разрыв между научным и научно-популярным изложением основ релятивистской динамики с каждым годом становится все более нетерпимым. И устранение этого разрыва невозможно без использования в учебной литературе по ТО единой современной научной терминологии, в которой не должно быть места для давно устаревших понятий типа «релятивистская масса» и «масса покоя».

Список использованных источников

1. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. – М. Мир, 1976. – 439.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. – М. Наука, 1973. – 502.
3. Савельев И.В. Основы теоретической физики. т.1. – М. Наука, 1973. – 414.
4. Окунь Л.Б. Понятие массы // УФН, 1989. – т.158. - №3. – с.512-530.
5. Тейлор Э., Уиллер Дж. Физика пространства-времени.- М. Мир, 1969. – 254.
6. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. т.1. – М. Наука, 1965. – с.38.
7. Alder C. Does mass really depend on velocity, dad? //Am. J. Phys. 1987. – v.55. – P.739-743.
8. Окунь Л.Б. О письме Р.Н. Храпко «Что есть масса» // УФН, 2000. – т.170. - №12. – с.1366-1371.
9. Глазунов А.Т. и др. Учебное пособие. – М. Просвещение, 1995. – 332.
10. Гельфгат И.М. и др. 1001 задача по физике. – М. ННМЦ, 1995. – 582.