

Энергия и масса в теории относительности и вокруг нее

Л.Б. Окунь

Доклад на заседании бюро ОФП РАН 6.06.2007 г.

Аннотация

Безвредно ли использовать понятие массы,
зависящей от скорости?

1. Масса, тело, наблюдатель

Все мы, сидящие здесь, хорошо знаем, что при последовательном изложении теории относительности массой следует называть свойство тела самого по себе, безотносительно к тому, с какой скоростью относительно него движется наблюдатель. Именно так и используется слово “масса” в научной литературе по физике элементарных частиц.

2. Масса в современной физике

В Женеве построен Большой адронный коллайдер. На нем будут проверять предсказания так называемой стандартной модели элементарных частиц, согласно которой за массы лептонов, кварков, W - и Z -бозонов ответственен бозон Хиггса.

Точнейшие измерения масс некоторых мезонов осуществлены в Новосибирске. Согласно квантовой хромодинамике, массы протонов, нейтронов и атомных ядер обычного вещества обусловлены самодействием безмассовых глюонов. Чем обусловлены массы частиц так называемого темного вещества, мы пока не знаем.

3. Ради наглядности?

Вместе с тем, многие из вас (а может быть, и большинство) не видят ничего плохого в том, чтобы для наглядности прибегнуть к понятию массы, растущей с ростом скорости. Доводом в пользу такой “релятивистской массы” обычно служит “знаменитая формула $E = mc^2$ ”, являющаяся логотипом не только физики, но и науки вообще.

Сегодня я рассмотрю основные аргументы, приводимые обычно для оправдания массы, растущей со скоростью, и соответствующие контраргументы.

4. Несколько простых формул

Они справедливы при любых скоростях тела:

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

m – инвариантная длина 4-вектора энергии-импульса $(E, \mathbf{p}c)$.

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

$$E = mc^2\gamma \quad (3)$$

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}\gamma \quad (4)$$

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}, \quad \beta = v/c \quad (5)$$

Для фотонов $m = 0$, $|\mathbf{p}| = E/c$.

Для нейтрино $m \ll E/c^2$, $|\mathbf{p}| \simeq E/c$.

$$\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt \quad (6)$$

m – не мера инерции.

Мера инерции E/c^2 , а для массивных частиц – $m\gamma$.

5. Великое открытие: E_0

Эйнштейн открыл энергию покоя E_0 в 1905 г. и четко сформулировал в книге “Сущность теории относительности” (1922):

$$E_0 = mc^2 \quad (7)$$

при $\mathbf{v} = 0$, $\mathbf{p} = 0$.

Колоссальные запасы энергии в обычном веществе: мирные и военные применения.

6. Нерелятивистский предел

Формулы, справедливые в нерелятивистском пределе:

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} \quad (8*)$$

$$E_{\text{kin}} \equiv E - E_0 = \frac{mv^2}{2} \quad (9*)$$

Звездочка * предупреждает, что эти формулы справедливы лишь при $v/c \ll 1$.

7. Два класса величин

Все величины можно разбить на два класса:
собственные и относительные.

Относительное движение наблюдателя и объекта.

$v, \mathbf{p}, E$ - относительные величины

m, E_0 - собственные величины

8. Масса двух тел

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 \quad (10)$$

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 \quad (11)$$

$$m = \sqrt{(E^2 - \mathbf{p}^2 c^2)/c^4} \neq m_1 + m_2 \quad (12)$$

Две буханки: $m = m_1 + m_2$.

Два фотона: $m = 0$, если $\mathbf{p}_1 = \mathbf{p}_2$.

$m = 2E/c^2$, если $\mathbf{p}_1 = -\mathbf{p}_2$.

Следовательно, масса в теории относительности не аддитивна.

9. “Релятивистская масса”

$$m_r = E/c^2$$

Пуанкаре (1900), Лоренц (1904), Эйнштейн (1909 ... 1911 ...)

m_r — аддитивна

m_r — мера инерции

Льюис и Толмен называли m_r *the mass* и обозначили ее m , а обычную массу m обозначили m_0 и называли массой покоя.

В результате этих переименований на трон физики была возведена формула

$$E = mc^2 \quad , \quad (13 **)$$

в которой только одна буква *c* имеет четкий физический смысл.

Так утвердилось понятие массы, зависящей от скорости. Утвердилось представление о том, что всегда, когда есть энергия, есть и масса. Знак ** предупреждает, что эта формула, “дитя переименований”, строго говоря, неприменима ни при каких скоростях.

10. Бритва Оккама

“Сущности не следует умножать без необходимости.”

Умножив число масс, размыв терминологическую границу между собственными и относительными величинами и создав тем самым путаницу, пропагандисты массы, зависящей от скорости, по-прежнему остаются с “проклятой неаддитивностью”, теперь уже “массы покоя”.

11. Философы и историки

Некоторые философы и историки науки (Кун, Файерабенд, Джеммер) не считают, что механика Ньютона является предельным случаем механики Эйнштейна, поскольку эти теории “несоизмеримы”, и потому одна и та же масса должна в них обозначаться по-разному: m и m_0 .

12. “Разгоним электрон до c ”?

“Релятивистский рост массы”

$m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ не объясняет невозможность разогнать постоянной силой F массивное тело до скорости света, если пользоваться ньютоновой формулой $F = ma$.

$$t_c = \int dt = \frac{cm_e}{F} \left(\frac{dv/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{\pi}{2} \right)$$

“Обман трудящихся”

13. Почему утюг тяжелеет?

“Релятивистский рост массы” и “масса кинетической энергии” часто используются для псевдо-объяснения того, почему при нагревании масса утюга возрастает.

При использовании последовательно релятивистской терминологии масса каждого атома в утюге не возрастает, а растет кинетическая энергия атомов и, следовательно, энергия покоя утюга (поскольку суммарный импульс атомов равен нулю). То же относится и к массе сосуда с нагретым газом, и к массе звезды.

14. Искривление луча света

“Релятивистская масса” не помогает понять искривление луча света гравитационным полем Солнца, т.к. притяжение “массы фотона” к массе Солнца дает лишь половину наблюдаемого угла отклонения. СТО полностью описывает этот эффект, так что “релятивистская масса” и здесь мешает пониманию.

15. Инерция и гравитация

Почему не нужны инерционная и гравитационная массы? В теории относительности, в отличие от ньютоновой механики, масса тела не является ни мерой инерции, ни мерой гравитационного притяжения. Первой мерой является энергия, второй – тензор энергии-импульса. Обе величины сводятся к массе m при $v/c \ll 1$, что решило загадку равенства так называемых “инерционной массы m_i ” и “гравитационной массы m_g ”, существующую со времени Ньютона.

Эксперименты Этвеша–Брагинского подтверждают, что энергия (а в нерелятивистском пределе – масса m) определяет как инерционные, так и гравитационные свойства тела. Но любители “умножать сущности” не спешат расставаться с понятиями m_i и m_g .

16. Корифеи физики о массе

Масса, зависящая от скорости, введенная в физику на рубеже XIX и XX веков, когда создавалась теория относительности, и по сей день доминирует в средствах массовой информации и энциклопедиях. Как это ни парадоксально, существенный вклад в ее пропаганду внесли монографии таких корифеев физики, как Паули, Борн, Фок. В их книгах рост массы с ростом скорости преподносится как экспериментальный факт, а не как артефакт, возникший в результате выбора недостаточно продуманных обозначений. При этом о существовании другого, последовательно релятивистского подхода, даже не упоминается.

17. Ландау о массе

Первый университетский учебник, в котором был реализован последовательно релятивистский подход, появился в 1940 году. Это была монография “Теория поля” Ландау и Лифшица. О массе, зависящей от скорости, в ней нет ни одного упоминания. Но Ландау и Румер в популярной брошюре “Что такое теория относительности ” не смогли устоять против “знаменитого уравнения $E = mc^2$ ”. В третьем издании брошюры Румер вспоминал шутливый отзыв Ландау о ней: “Два жулика уговаривают третьего, что за гривенник он может понять, что такое теория относительности.”

18. Фейнман о массе

Другая психологическая загадка – это трактовка понятия массы в творчестве Фейнмана. В научных статьях, в которых были введены фейнмановские графики, принесшие ему Нобелевскую премию, Фейнман пользовался только массой, которая не зависит от скорости. Но в основу изложения теории относительности в самом знаменитом курсе физики “Фейнмановских лекциях по физике” он положил “экспериментальный факт” зависимости массы от скорости. Готовясь к этому докладу, я обменялся письмами по электронной почте со многими его учениками и сотрудниками.

Никто не смог объяснить, почему это произошло. Его соавтор Сэндс написал мне, что сам он предпочитает массу, на зависящую от скорости, но допускает, что масса, зависящая от скорости, более педагогична.

19. $E = mc^2$ в год физики

2005 год был объявлен годом физики, чтобы ознаменовать столетие работ Эйнштейна, в одной из которых было впервые введено понятие энергии покоя E_0 . В связи с этим в журналах “Scientific American”, “Physics World” и др. появились статьи, прославлявшие “знаменитую формулу $E = mc^2$ ”. Редактор “Physics World” опубликовал мое письмо в редакцию в защиту массы, не зависящей от скорости. Редактор “Scientific American” отказался печатать аналогичное письмо, чтобы не смущать своих читателей: “... would be very confusing to our general audience and it would make the subject seen all the more mysterious and impenetrable to them”.

Таким образом, от широкого круга читателей скрывают существование рациональной последовательно релятивистской терминологии, используемой теми физиками, для которых теория относительности является рабочим инструментом.

20. Понятие массы и РАН

Мне представляется, что обязанность нашего отделения РАН – сделать все от нас зависящее, чтобы достаточно полная информация о соотношении энергии и массы была доступна максимально большому числу физиков, студентов и школьников в нашей стране.