

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

530.12 :531[.18+51J

ПОНЯТИЕ МАССЫ

(Масса, энергия, относительность)

Л. Б. Окунь

(Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва)

СОДЕРЖАНИЕ

1. Небольшой тест вместо введения	511
I. Факты	513
2. Масса в ньютоновой механике	513
3. Принцип относительности Галилея	514
4. Принцип относительности Эйнштейна	514
5. Энергия, импульс и масса в теории относительности	515
6. Предельные случаи релятивистских уравнений	516
7. Связь между силой и ускорением в теории относительности	517
8. Гравитационное притяжение в теории относительности	517
9. Масса системы частиц	518
10. Примеры взаимопревращений энергии покоя и кинетической энергии	519
11. Сравнение роли массы в теориях Эйнштейна и Ньютона	520
12. Природа массы — вопрос № 1 современной физики	521
II. Артефакты	521
13. На стыке столетий: четыре «массы»	521
14. Масса и энергия в статьях Эйнштейна 1905 г.	523
15. «Обобщенная формула Пуанкаре»	523
16. Тысяча и две книги	524
17. Импринтинг и массовая культура	525
18. Почему плохо называть массой E/c^2	526
19. «Папа, а масса действительно зависит от скорости?»	527
20. «Физика в школе»	528
Список литературы	529

1. Небольшой тест вместо введения. Соотношение Эйнштейна, устанавливающее связь между массой тела и содержащейся в нем энергией, несомненно, является самой знаменитой формулой теории относительности. Оно позволило по-новому, более глубоко понять окружающий нас мир. Его практические следствия огромны и в значительной своей части трагичны. В некотором смысле эта формула стала символом науки XX века.

Зачем понадобилась еще одна статья об этом знаменитом соотношении, о котором и так уже написаны тысячи статей и сотни книг?

Прежде чем я отвечу на этот вопрос, подумайте, в какой форме, по Вашему мнению, наиболее адекватно выражается физический смысл соотношения между массой и энергией. Перед Вами четыре формулы:

$$E_0 = mc^2, \quad (1.1)$$

$$E = mc^2, \quad (1.2)$$

$$E_0 = m_0 c^2, \quad (1.3)$$

$$E = m_0 c^2; \quad (1.4)$$

здесь c — скорость света, E — полная энергия тела, m — его масса, E_0 — энергия покоя, m_0 — масса покоя того же тела. Выпишите, пожалуйста, номера этих формул в том порядке, в котором Вы считаете их более «правильными». А теперь продолжайте чтение.

В научно-популярной литературе, школьных учебниках и подавляющей части вузовских учебников доминирует формула (1.2) (и ее следствие — формула (1.3)), которую обычно читают справа налево и интерпретируют так: масса тела растет с его энергией — как внутренней, так и кинетической.

Подавляющее большинство серьезных монографий и научных статей по теоретической физике, особенно по теоретической физике элементарных частиц, для которой специальная теория относительности является рабочим инструментом, формул (1.2) и (1.3) вообще не содержат. Согласно этим книгам масса тела m не меняется при его движении и с точностью до множителя c равна энергии, содержащейся в покоящемся теле, т. е. справедлива формула (1.1). При этом как сам термин «масса покоя», так и обозначение m_0 являются избыточными и потому не употребляются. Итак, существует как бы пирамида, основание которой составляют издаваемые миллионными тиражами научно-популярные книги и школьные учебники, а вершину — монографии и статьи по теории элементарных частиц, тиражи которых исчисляются тысячами.

Между верхом и низом этой теоретической пирамиды имеется значительное число книг и статей, где загадочным образом мирно сосуществуют все три (и даже четыре!) формулы. В сложившейся ситуации виноваты в первую очередь физики-теоретики, до сих пор не разъяснившие широким кругам образованных людей этот абсолютно простой вопрос.

Цель этой статьи — как можно более просто объяснить, почему формула (1.1) адекватна сути теории относительности, а формулы (1.2) и (1.3) — нет, и таким образом способствовать распространению в учебной и научно-популярной литературе четкой, не вводящей в заблуждение и не приводящей к недоразумениям терминологии. Такую терминологию я в дальнейшем буду называть правильной. Я надеюсь, что мне удастся убедить читателя в том, что термин «масса покоя» m_0 является излишним, что вместо «массы покоя» m_0 следует говорить о массе тела m , которая для обычных тел в теории относительности и в ньютоновой механике — одна и та же, что в обеих теориях масса m не зависит от системы отсчета, что понятие массы, зависящей от скорости, возникло в начале XX века в результате незаконного распространения ньютоновского соотношения между импульсом и скоростью на область скоростей, сравнимых со скоростью света, в которой оно несправедливо, и что в конце XX века с понятием массы, зависящей от скорости, пора окончательно распрощаться.

Статья состоит из двух частей. В первой части (разделы 2—12) обсуждается роль массы в механике Ньютона. Затем рассмотрены основные формулы теории относительности, связывающие энергию и импульс частицы с ее массой и скоростью, устанавливается связь ускорения с силой и приведено релятивистское выражение для гравитационной силы. Показано, как определяется масса системы, состоящей из нескольких частиц, и рассмотрены примеры физических процессов, в результате которых масса тела или системы тел меняется, причем это изменение сопровождается поглощением или испусканием частиц, несущих кинетическую энергию. Первая часть статьи завершается кратким рассказом о современных попытках теоретически вычислить массы элементарных частиц.

Во второй части (разделы 13—20) рассказано об истории возникновения понятия массы тела, растущей с его энергией, так называемой релятивистской массы. Показано, что использование этого архаичного по-

нения не отвечает четырехмерно-симметричной форме теории относительности и ведет к многочисленным недоразумениям в учебной и научно-популярной литературе.

1. Факты.

2. Масса в ньютоновой механике. Как хорошо известно, масса в ньютоновой механике обладает рядом важных свойств, и проявляется, так сказать, в нескольких обликах:

1. Масса является мерой количества вещества, количества материи.
2. Масса составного тела равна сумме масс составляющих его тел.
3. Масса изолированной системы тел сохраняется, не меняется со временем.
4. Масса тела не меняется при переходе от одной системы отсчета к другой, в частности, она одинакова в различных инерциальных системах координат.
5. Масса тела является мерой его инертности (или инерции, или инерционности, как пишут некоторые авторы).
6. Массы тел являются источником их гравитационного притяжения друг к другу.

Обсудим более подробно два последних свойства массы.

Как мера инерции тела, масса m выступает в формуле, связывающей импульс тела $\mathbf{p}$ и его скорость $\mathbf{v}$:

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}. \quad (2.1)$$

Масса входит также и в формулу для кинетической энергии тела E_{kin} :

$$E_{\text{kin}} = \frac{\mathbf{p}^2}{2m} = \frac{m\mathbf{v}^2}{2}. \quad (2.2)$$

В силу однородности пространства и времени импульс и энергия свободного тела сохраняются в инерциальной системе координат. Импульс данного тела меняется со временем только под воздействием других тел:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F}, \quad (2.3)$$

где $\mathbf{F}$ — сила, действующая на тело. Если учесть, что по определению ускорения $\mathbf{a}$

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}, \quad (2.4)$$

и учесть формулы (2.1) и (2.3), то получим

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}. \quad (2.5)$$

В этом соотношении масса снова выступает как мера инерции. Таким образом, в ньютоновой механике масса как мера инерции определяется двумя соотношениями: (2.1) и (2.5). Одни авторы предпочитают определять меру инерции соотношениями (2.1), другие — соотношением (2.5). Для предмета нашей статьи важно лишь, что оба эти определения совместимы в ньютоновой механике.

Обратимся теперь к гравитации. Потенциальная энергия притяжения между двумя телами с массами M и m (например, Земли и камня), равна

$$U_g = -\frac{GMm}{r}, \quad (2.6)$$

где $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \text{кг}^{-2}$ (напомним, что $1\text{Н} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2}$). Сила, с кото-

рой Земля притягивает камень, равна

$$\mathbf{F}_g = - \frac{GMm\mathbf{r}}{r^3}, \quad (2.7)$$

где радиус-вектор $\mathbf{r}$, соединяющий центры масс тел, направлен от Земли к камню. (С такой же, но противоположно направленной силой камень притягивает Землю.)

Из формул (2.7) и (2.5) следует, что ускорение тела, свободно падающего в гравитационном поле, не зависит от его массы. Ускорение в поле Земли обычно обозначают g :

$$g = \frac{\mathbf{F}_g}{m} = - \frac{GM\mathbf{r}}{r^3}. \quad (2.8)$$

Как нетрудно оценить, подставив в формулу (2.9) значения массы и радиуса Земли ($M_\oplus \approx 6 \cdot 10^{24}$ кг, $R_\oplus \approx 6,4 \cdot 10^6$ м), $g \approx 9,8$ м/с².

Впервые универсальность величины g была установлена Галилеем, который пришел к выводу, что ускорение падающего шара не зависит ни от массы шара, ни от материала, из которого он сделан. С очень высокой степенью точности эта независимость была проверена в начале XX в. Этвешем и в ряде недавних экспериментов. Независимость гравитационного ускорения от массы ускоряемого тела в школьном курсе физики обычно характеризуют как равенство инертной и гравитационной массы, имея при этом в виду, что одна и та же величина m входит как в формулу (2.5), так и в формулы (2.6) и (2.7).

Мы не будем здесь обсуждать другие свойства массы, перечисленные в начале этого раздела, поскольку они кажутся самоочевидными с точки зрения здравого смысла. В частности, ни у кого не вызывает сомнения, что масса вазы равна сумме масс ее осколков:

$$m = \sum_i m_i. \quad (2.9)$$

Никто не сомневается также в том, что масса двух автомобилей равна сумме их масс независимо от того, стоят они или мчатся с предельной скоростью навстречу друг другу.

3. Принцип относительности Галилея. Если отвлечься от конкретных формул, то можно сказать, что квинтэссенцией ньютоновой механики является принцип относительности.

В одной из книг Галилея есть яркое рассуждение на тему о том, что в каюте корабля с зашторенным иллюминатором никакими механическими опытами нельзя обнаружить равномерное и прямолинейное движение корабля относительно берега. Приводя этот пример, Галилей подчеркивал, что никакие механические опыты не могут отличить одну инерциальную систему отсчета от другой. Это утверждение получило название принципа относительности Галилея. Математически этот принцип выражается в том, что уравнения ньютоновой механики не меняются при переходе к новым координатам: $\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r}' = \mathbf{r} - \mathbf{V}t$, $t \rightarrow t' = t$, где $\mathbf{V}$ — скорость новой инерциальной системы относительно исходной.

4. Принцип относительности Эйнштейна. В начале XX века был сформулирован более общий принцип, получивший название принципа относительности Эйнштейна. Согласно принципу относительности Эйнштейна не только механические, но и любые другие эксперименты (оптические, электрические, магнитные и т. д.) не могут отличить одну инерциальную систему от другой. Теория, построенная на этом принципе, получила название теории относительности, или релятивистской теории

(латинский термин «релятивизм» эквивалентен русскому термину «относительность»).

Релятивистская теория, в отличие от нерелятивистской (ньютоновой механики), учитывает, что в природе существует предельная скорость c распространения физических сигналов: $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Обычно о величине c говорят как о скорости света в пустоте. Релятивистская теория дает возможность рассчитывать движение тел (частиц) с любыми скоростями v вплоть до $v = c$. Нерелятивистская ньютонова механика является предельным случаем релятивистской эйнштейновской механики при $v/c \rightarrow 0$. Формально в ньютоновой механике нет предельной скорости распространения сигналов, т. е. $c = \infty$.

Введение эйнштейновского принципа относительности потребовало изменения взгляда на такие фундаментальные понятия, как пространство, время, одновременность. Оказалось, что по отдельности расстояния между двумя событиями в пространстве $\mathbf{r}$ и во времени t не остаются неизменными при переходе от одной инерциальной системы координат к другой, а ведут себя как компоненты четырехмерного вектора в четырехмерном пространстве-времени Минковского. Неизменной, инвариантной остается при этом лишь величина s , называемая интервалом: $s^2 = c^2 t^2 - \mathbf{r}^2$,

5. Энергия, импульс и масса в теории относительности. Основными соотношениями теории относительности для свободной движущейся частицы (системы частиц, тела) являются

$$E^2 - \mathbf{p}^2 c^2 = m^2 c^4, \quad (5.1)$$

$$\mathbf{p} = \frac{\mathbf{v} E}{c^2}; \quad (5.2)$$

здесь E — энергия, $\mathbf{p}$ — импульс, m — масса, а $\mathbf{v}$ — скорость частицы (системы частиц, тела). Следует подчеркнуть, что масса m и скорость $\mathbf{v}$ для частицы или тела — это те же самые величины, с которыми мы имеем дело в ньютоновой механике. Подобно четырехмерным координатам t , $\mathbf{r}$, энергия E и импульс $\mathbf{p}$ являются компонентами четырехмерного вектора. Они меняются при переходе от одной инерциальной системы к другой согласно преобразованиям Лоренца. Масса же остается при этом неизменной, она является лоренцевым инвариантом.

Следует подчеркнуть, что, как и в ньютоновой механике, в теории относительности имеют место законы сохранения энергии и импульса изолированной частицы или изолированной системы частиц.

Кроме того, как и в ньютоновой механике, энергия и импульс аддитивны: полные энергия и импульс n свободных частиц равны соответственно

$$E = \sum_{i=1}^n E_i, \quad \mathbf{p} = \sum_{i=1}^n \mathbf{p}_i. \quad (5.3)$$

Что касается массы, то в теории относительности масса изолированной системы сохраняется, не меняется со временем, но свойством аддитивности не обладает (см. ниже).

Важнейшим отличием теории относительности от нерелятивистской механики является то, что энергия массивного тела не обращается в нуль, даже когда такое тело покоится, т. е. при $\mathbf{v} = 0$, $\mathbf{p} = 0$. Как «видно из (2.1), энергия покоя тела (ее обычно обозначают E_0) пропорциональна его массе:

$$E_0 = mc^2. \quad (5.4)$$

Именно утверждение о том, что в инертной покоящейся материи таятся огромные (благодаря квадрату предельной скорости c) запасы энергии, сделанное Эйнштейном в 1905 г., является главным практическим след-

ствием теории относительности. На соотношении (5.4) основана вся ядерная энергетика и вся ядерная военная техника. Возможно, не столь широко известно, что на этом же соотношении основана и вся обычная энергетика.

6. Предельные случаи релятивистских уравнений. Замечательным свойством уравнений (5.1) и (5.2) является то, что они описывают движение частиц во всем интервале скоростей: $0 \leq v \leq c$. В частности, при $v=c$ из (5.2) следует, что

$$pc = E. \quad (6.1)$$

Подставив это равенство в (5.1), мы приходим к выводу, что если частица движется со скоростью c , то ее масса равна нулю, и наоборот. У безмассовой частицы нет системы координат, где она покоится, покой ей «только снится».

Для массивных частиц (так мы будем называть частицы с ненулевой массой, даже если они очень легкие) формулы для энергии и импульса удобно выразить через массу и скорость. Для этого подставим (5.2) в (5.1):

$$E^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = m^2 c^4, \quad (6.2)$$

и, извлекая квадратный корень, получим

$$E = mc^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}. \quad (6.3)$$

Подставляя (6.3) в (5.2), получим

$$p = mv \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}. \quad (6.4)$$

Из формул (6.3) и (6.4) очевидно, что массивное тело (с $m \neq 0$) не может двигаться со скоростью света, так как при этом должны обратиться в бесконечность энергия и импульс тела.

В литературе по теории относительности обычно используются обозначения

$$\beta = \frac{v}{c}, \quad (6.5)$$

$$\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}. \quad (6.6)$$

Используя γ , можно записать E и p в виде

$$E = mc^2 \gamma, \quad (6.7)$$

$$p = mv \gamma. \quad (6.8)$$

Определим кинетическую энергию E_{kin} как разность полной энергии E и энергии покоя E_0 :

$$E_{\text{kin}} = E - E_0 = mc^2 (\gamma - 1). \quad (6.9)$$

В пределе, когда $v/c \ll 1$, в выражениях (6.8), (6.9) следует оставить первые члены ряда по β . Тогда мы естественным образом возвращаемся к формулам механики Ньютона:

$$p = mv, \quad (6.10)$$

$$E_{\text{kin}} = \frac{p^2}{2m} = \frac{mv^2}{2}, \quad (6.11)$$

откуда видно, что масса тела в ньютоновой механике и масса того же тела в релятивистской механике — это одна и та же величина.

7. Связь между силой и ускорением в теории относительности. Можно показать, что в теории относительности сохраняется ньютоново соотношение между силой $\mathbf{F}$ и изменением импульса

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}. \quad (7.1)$$

Используя соотношение (7.1) и определение ускорения

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}, \quad (7.2)$$

легко получить

$$\mathbf{F} = m\gamma\mathbf{a} + m\gamma^3\beta(\beta\mathbf{a}). \quad (7.3)$$

Мы видим, что, в отличие от нерелятивистского случая, ускорение в релятивистском случае не направлено по силе, а имеет также составляющую по скорости. Умножая (7.3) на $\mathbf{v}$, найдем

$$\mathbf{a}\mathbf{v} = \frac{\mathbf{F}\mathbf{v}}{m\gamma(1 + \gamma^2\beta^2)} = \frac{\mathbf{F}\mathbf{v}}{m\gamma^3}. \quad (7.4)$$

Подставив это в (7.3), получим

$$\mathbf{F} - (\mathbf{F}\beta)\beta = m\gamma\mathbf{a}. \quad (7.5)$$

Несмотря на необычность уравнения (7.3) с точки зрения ньютоновой механики, а вернее, именно благодаря этой необычности, это уравнение правильно описывает движение релятивистских частиц. С начала века оно многократно подвергалось экспериментальным проверкам в различных конфигурациях электрических и магнитных полей. Это уравнение является основой инженерных расчетов релятивистских ускорителей.

Итак, если $\mathbf{F} \perp \mathbf{v}$, то

$$\mathbf{F} = m\gamma\mathbf{a}, \quad (7.6)$$

если же $\mathbf{F} \parallel \mathbf{v}$, то

$$\mathbf{F} = m\gamma^3\mathbf{a}. \quad (7.7)$$

Таким образом, если попытаться определить как «инертную массу» отношение силы к ускорению, то эта величина в теории относительности зависит от взаимного направления силы и скорости, и потому однозначным образом ее определить нельзя. К такому же заключению относительно «гравитационной массы» приводит рассмотрение гравитационного взаимодействия.

8. Гравитационное притяжение в теории относительности. Если в ньютоновой теории сила гравитационного взаимодействия определяется массами взаимодействующих тел, то в релятивистском случае ситуация значительно сложнее. Дело в том, что в релятивистском случае источником гравитационного поля является сложная величина, имеющая десять различных компонент, — так называемый тензор энергии-импульса тела. (Для сравнения укажем, что источником электромагнитного поля является электромагнитный ток, являющийся четырехмерным вектором и имеющий четыре компоненты.)

Рассмотрим самый простой пример, когда одно из тел имеет очень большую массу M и находится в покое (например, Солнце или Земля), а другое имеет очень малую или даже нулевую массу, например электрон или фотон с энергией E . Исходя из общей теории относительности,

можно показать, что в этом случае сила, действующая на легкую частицу, равна

$$\mathbf{F} = -GM \frac{E}{c^2} [(1 + \beta^2) \mathbf{r} - (\mathbf{r}\beta) \beta] r^{-3}. \quad (8.1)$$

Легко видеть, что для медленного электрона с $\beta \ll 1$ выражение в квадратной скобке сводится к $\mathbf{r}$, и, учитывая, что $E_0/c^2 = m$, мы возвращаемся к нерелятивистской формуле Ньютона. Однако при $v/c \sim 1$ или $v/c = 1$ мы сталкиваемся с принципиально новым явлением: величина, играющая роль «гравитационной массы» релятивистской частицы, оказывается зависящей не только от энергии частицы, но и от взаимного направления векторов $\mathbf{r}$ и $\mathbf{v}$. Если $\mathbf{v} \parallel \mathbf{r}$, то «гравитационная масса» равна E/c^2 , но если $\mathbf{v} \perp \mathbf{r}$, то она становится равной $(E/c^2)(1 + \beta^2)$, а для фотона $2E/c^2$.

Мы используем кавычки, чтобы подчеркнуть, что для релятивистского тела понятие гравитационной массы неприменимо. Бессмысленно говорить о гравитационной массе фотона, если для вертикально падающего фотона эта величина в два раза меньше, чем для летящего горизонтально.

Обсудив различные аспекты динамики одной релятивистской частицы, обратимся теперь к вопросу о массе системы частиц.

9. Масса системы частиц. Мы уже отметили выше, что в теории относительности масса системы не равна массе составляющих систему тел. Это утверждение можно проиллюстрировать несколькими примерами.

1. Рассмотрим два фотона, разлетающихся в противоположные стороны с одинаковыми энергиями E . Суммарный импульс такой системы равен нулю, а суммарная энергия (она же энергия покоя системы двух фотонов) равна $2E$. Следовательно, масса этой системы равна $2E/c^2$. Легко убедиться, что система двух фотонов будет иметь нулевую массу только в том случае, когда они летят в одном направлении.

2. Рассмотрим систему, состоящую из n тел. Масса этой системы определяется формулой

$$m = \left[\left(\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{c^2} \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{p}_i}{c} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (9.1)$$

где $\sum_i E_i$ — сумма энергий этих тел, а $\sum \mathbf{p}_i$ — векторная сумма их импульсов.

Два первых примера характерны тем, что представляют собой системы свободных частиц; размеры этих систем неограниченно растут со временем по мере разлета составляющих их частиц. Обратимся теперь к системам, размеры которых остаются неизменными.

3. Рассмотрим атом водорода, состоящий из протона и электрона. Энергия покоя атома E_0 с хорошей точностью может быть представлена суммой четырех слагаемых:

$$E_0 = m_p c^2 + m_e c^2 + E_{\text{kin}} + U, \quad (9.2)$$

где m_p — масса протона, m_e — масса электрона, E_{kin} и U — кинетическая и потенциальная энергии электрона.

Потенциальная энергия U обусловлена взаимным притяжением электрических зарядов протона и электрона, которое не дает электрону улечь от протона. Из теории, исчерпывающе проверенной опытом, следует, что

$$E_{\text{kin}} + U = -E_{\text{kin}} = -\frac{1}{2} m_e v_e^2, \quad (9.3)$$

где $v_e \approx c/137$ — скорость электрона в атоме водорода. Отсюда

$$m_H = \frac{E_0}{c^2} = m_p + m_e - \frac{m_e v_e^2}{2c^2}. \quad (9.4)$$

Таким образом, масса атома водорода на несколько сотысячных долей массы электрона меньше, чем $m_p + m_e$.

4. Рассмотрим дейтрон — ядро тяжелого изотопа водорода, состоящее из протона и нейтрона. Протон и нейтрон притягиваются сильнее и движутся быстрее, чем электрон в атоме водорода. В результате масса дейтрона примерно на 0,1% меньше, чем сумма масс протона и нейтрона.

По существу, два последних примера мы рассмотрели на основе Нерелятивистской механики, поскольку обсуждаемые разности масс, или, как их называют, дефекты масс, хотя и существенны, но достаточно малы по сравнению с самими массами.

Теперь самое время вспомнить о разбитой вазе, упомянутой в разделе 2. Сумма масс осколков вазы равна массе вазы с той точностью, с которой энергия связи этих осколков мала по сравнению с их энергией покоя.

10. Примеры взаимопревращений энергии покоя и кинетической энергии. В ядерных или химических реакциях энергия покоя должна в силу закона сохранения энергии переходить в кинетическую энергию продуктов реакции, если суммарная масса частиц, вступающих в реакцию, больше суммарной массы продуктов реакции. Рассмотрим четыре примера:

1. При аннигиляции электрона и позитрона в два фотона вся энергия покоя электрона и позитрона переходит в кинетическую энергию фотонов.

2. В результате термоядерных реакций, идущих на Солнце, происходит превращение двух электронов и четырех протонов в ядро гелия и два нейтрино:



Выделяемая энергия $E_{\text{kin}} = 29,3$ МэВ. Если учесть, что масса протона 938 МэВ, а масса электрона 0,5 МэВ, то относительное уменьшение массы порядка процента ($\Delta m/m = 0,8 \cdot 10^{-2}$).

3. При столкновении медленного нейтрона с ядром ${}^{235}\text{U}$ ядро делится на два осколка, вылетают 2 или 3 нейтрона, способных поразить другие ядра урана, и выделяется энергия $E_{\text{kin}} \approx 200$ МэВ. В этом случае, как легко убедиться, $\Delta m/m = 0,9 \cdot 10^{-3}$.

4. В реакции горения метана в газовой горелке на кухне



выделяется энергия, равная 35,6 МДж на кубический метр метана. Учитывая, что плотность метана 0,89 кг/м³, нетрудно найти, что в этом случае $\Delta m/m = 10^{-10}$. В химических реакциях величина $\Delta m/m$ на 7–8 порядков меньше, чем в ядерных, но суть механизма выделения энергии та же: энергия покоя переходит в кинетическую энергию.

Чтобы подчеркнуть, что масса тела меняется всегда, когда меняется его внутренняя энергия, рассмотрим два обыденных примера:

1) при нагревании железного утюга на 200° его масса возрастает на величину $\Delta m/m = 10^{-12}$ (это легко оценить, если учесть, что теплоемкость железа составляет 450 Дж/кг·град);

2) при полном превращении некоторого количества льда в воду $\Delta m/m = 3,7 \cdot 10^{-12}$.

11. Сравнение роли массы в теориях Эйнштейна и Ньютона. Суммируя сказанное выше, целесообразно сравнить роль массы в механике Эйнштейна с ее ролью в механике Ньютона.

1. В теории относительности, в отличие от механики Ньютона, масса системы не является мерой количества материи. Само понятие материи в релятивистской теории гораздо богаче, чем в нерелятивистской. В релятивистской теории нет принципиальной разницы между веществом (протонами, нейтронами, электронами) и излучением (фотонами).

Протоны, нейтроны, электроны и фотоны являются наиболее часто встречающимися в природе представителями большого семейства так называемых элементарных частиц. Возможно, что фотоны не единственные частицы, имеющие нулевую массу. Не исключено, например, что нулевой массой обладают некоторые типы нейтрино. Возможно, что существуют и другие безмассовые частицы, которые не открыты пока из-за того, что их очень трудно обнаружить с помощью имеющихся приборов.

2. В нерелятивистской теории, чем больше отдельных частиц (атомов) содержит система (гиря), тем больше ее масса. В релятивистской теории, когда энергии частиц очень велики по сравнению с их массами, масса системы частиц определяется не только и не столько их числом, сколько их энергиями и взаимной ориентацией импульсов. Масса составного тела не равна сумме масс составляющих его тел.

3. Как и в ньютоновой механике, масса изолированной системы тел сохраняется, не меняется со временем. Только теперь, разумеется, в число этих тел необходимо включить не только «вещество», скажем атомы, но и «излучение» (фотоны).

4. Как и в ньютоновой механике, в теории относительности масса тела не меняется при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой.

5. Масса релятивистски движущегося тела не является мерой его инертности. Более того, единой меры инертности для релятивистски движущихся тел вообще не существует, поскольку сопротивление тела уско-ряющей его силе зависит от угла между силой и скоростью.

6. Масса релятивистски движущегося тела не определяет его взаимодействия с гравитационным полем. Это взаимодействие определяется выражением, зависящим от энергии и импульса тела.

Несмотря на четыре «не» масса тела и в теории относительности является его важнейшей характеристикой. Равная нулю масса означает, что «тело» должно всегда двигаться со скоростью света. Неравная нулю масса характеризует механику тела в системе отсчета, где оно движется медленно или покоится. Эта система отсчета является выделенной по сравнению с другими инерциальными системами.

7. Согласно теории относительности масса частицы является мерой энергии, «спящей» в покоящейся частице, мерой энергии покоя: $E_0 = mc^2$. Это свойство массы было неизвестно в нерелятивистской механике.

Масса элементарной частицы является одной из ее важнейших характеристик. Ее стараются измерить с наилучшей точностью. Для стабильных или долгоживущих частиц массу определяют путем независимого измерения энергии и импульса частицы и применения формулы $m^2 = (E^2/c^4) - (\mathbf{p}^2/c^2)$. Массы короткоживущих частиц определяют путем измерения энергий и импульсов частиц, рождающихся при их распаде или «присутствующих» при их рождении.

Сведения о массах всех элементарных частиц наряду с другими их свойствами (временем жизни, спином, способами распада) содержатся в регулярно обновляемых сборниках.

12. Природа массы — вопрос № 1 современной физики. За последние десятилетия произошел большой прогресс в понимании свойств элементарных частиц. Была построена квантовая электродинамика — теория взаимодействия электронов с фотонами, заложены основы квантовой хромодинамики — теории взаимодействия кварков с глюонами и теории электрослабого взаимодействия. Во всех этих теориях частицами-переносчиками взаимодействий являются так называемые векторные бозоны — частицы, имеющие спин, равный единице: фотон, глюоны, W- и Z-бозоны.

Что касается масс частиц, то здесь достижения гораздо более скромные. На рубеже XIX и XX столетий существовала вера, что масса может иметь чисто электромагнитное происхождение, по крайней мере для электрона. Сегодня мы знаем, что электромагнитная доля массы электрона составляет малую долю его полной массы. Мы знаем, что основной вклад в массы протонов и нейтронов дают сильные взаимодействия, обусловленные глюонами, а не массы кварков, входящих в состав протонов и нейтронов.

Но мы совершенно ничего не знаем о том, чем обусловлены массы шести лептонов (электрона, нейтрино и еще четырех аналогичных им частиц) и шести кварков (из которых три первых существенно легче протона, четвертый — немного, а пятый в пять раз тяжелее протона, а шестой настолько массивен, что его пока не удалось создать и обнаружить).

Существуют теоретические догадки, что в создании масс лептонов и кварков, а также W- и Z-бозонов решающую роль играют гипотетические частицы со спином, равным нулю. Поиски этих частиц — одна из основных задач физики высоких энергий.

II. Артефакты.

13. На стыке столетий: четыре «массы». Все изложенное в первой части этой статьи известно любому физiku-теоретику, имевшему когда-либо дело со специальной теорией относительности. С другой стороны, любой физик и не только физик, слышал о «знаменитом» соотношении Эйнштейна $E=mc^2$. Поэтому естественно задать вопрос, каким образом осуществляется в литературе и умах читателей мирное сосуществование взаимоисключающих формул:

$$E_0 = mc^2,$$

$$E = mc^2.$$

Прежде чем искать ответ на этот вопрос, еще раз напомним, что согласно первой формуле массе покоящегося тела отвечает энергия покоя E_0 , а согласно второй любое тело с энергией E имеет массу E/c^2 . Согласно первой масса тела не меняется при его движении. Согласно второй масса тела растет с ростом скорости тела. Согласно первой фотон безмассов, согласно второй у фотона есть масса, равная E/c^2 .

Чтобы ответить на поставленный вопрос о сосуществовании формул, нам придется обратиться к истории создания, интерпретации и признания специальной теории относительности.

При обсуждении вопроса о связи массы и энергии в качестве отправной точки обычно берется статья Дж. Дж. Томсона [1], опубликованная в 1881 г. В этой статье была сделана первая попытка оценить вклад в инертную массу электрически заряженного тела, вносимый энергией электромагнитного поля этого тела.

Обычно рождение теории относительности связывают со статьей Эйнштейна 1905 г. [2], в которой была четко сформулирована относительность одновременности. Но, разумеется, работа над созданием и интерпретацией теории началась задолго до 1905 г. и продолжалась долгое время после этого.

Если говорить об интерпретации, то процесс, по-видимому, происходит до сих пор. Иначе не было бы необходимости писать данную статью. Что касается признания, то можно сказать, что даже в конце 1922 г., когда Эйнштейну была присуждена Нобелевская премия, теория относительности не была общепризнанной.

Секретарь Шведской академии наук писал Эйнштейну, что Академия присудила ему Нобелевскую премию за открытие закона фотоэффекта, «но не учитывая ценность, которая будет (признана за Вашими теориями относительности и гравитации, после того, как они в будущем будут подтверждены» (цитируется по книге А. Пайса [3]).

Формула $E = mc^2$ появилась в 1900 г., до создания теории относительности. Написал ее А. Пуанкаре, который исходил из того, что плоская световая волна, несущая энергию E , несет импульс $\mathbf{p}$, абсолютная величина которого, в соответствии с теоремой Пойнтинга, равна E/c . Используя нерелятивистскую формулу Ньютона для импульса $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ и учитывая, что для света $v = c$, Пуанкаре [4] пришел к выводу, что фотон должен обладать инертной массой $m = E/c^2$.

Еще за год до этого, в 1899 г., Лоренц [5] впервые ввел понятие продольной и поперечной масс ионов, первая из которых растет с ростом скорости как γ^3 , а вторая как γ . К этому выводу он пришел, используя ньютонову связь между силой и ускорением $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$. Подробное рассмотрение этих масс для электронов содержится в его статье [6], опубликованной в 1904 г.

Так на границе столетий из-за, как мы теперь понимаем, незаконного использования нерелятивистских формул для описания релятивистских объектов, возникло семейство «масс», растущих с энергией тела:

$$\begin{aligned} \text{«релятивистская масса» } m &= E/c^2, \\ \text{«поперечная масса» } m_t &= m\gamma, \\ \text{«продольная масса» } m_l &= m\gamma^3. \end{aligned}$$

Заметим, что при $m \neq 0$ релятивистская масса равна поперечной, но, в отличие от поперечной, она имеется и у безмассовых тел, у которых $m = 0$. Здесь букву m мы употребляем в обычном смысле, так как употребляли ее в первой части этой статьи. Но все физики в первые пять лет этого века, т. е. до создания теории относительности, а (многие и после создания теории относительности называли массой и обозначали буквой m релятивистскую массу, как это сделал Пуанкаре в работе 1900 г. И тогда с неизбежностью должен был возникнуть и возник еще один, четвертый термин: «масса покоя», которую стали обозначать m_0 . Термином «масса покоя» стали называть обычную массу, которую при последовательном изложении теории относительности обозначают m .

Так появилась «банда четырех», которой удалось успешно внедриться в рождающуюся теорию относительности. Так были созданы необходимые предпосылки для путаницы, продолжающейся по сегодняшний день.

С 1900 г. начались специальные опыты с β -лучами и катодными лучами, т. е. с энергичными электронами, пучки которых отклонялись магнитными и электрическими полями (см. книгу А. Миллера [7]).

Эти опыты назывались опытами по измерению зависимости массы от скорости, и в течение почти всего первого десятилетия нашего века их результаты не согласовывались с полученными Лоренцом выраже-

ниями для m_i и m_r , а по существу опровергали теорию относительности и находились в хорошем согласии с неправильной теорией М. Абрагама. В дальнейшем согласие с формулами Лоренца возобладало, но из цитированного выше письма секретаря Шведской академии наук видно, что оно не выглядело абсолютно убедительным.

14. Масса и энергия в статьях Эйнштейна 1905 г. В первой работе Эйнштейна по теории относительности [2] он, как и все в то время, пользуется понятиями продольной и поперечной массы, но не обозначает их специальными символами, а для кинетической энергии W получает соотношение

$$W = \mu V^2 \left\{ \frac{1}{[1 - (v^2/V^2)]^{1/2}} - 1 \right\},$$

где μ — масса, а V — скорость света. Таким образом, понятием «масса покоя» он не пользуется.

В том же 1905 г. Эйнштейн печатает короткую заметку [8], в которой приходит к выводу, «что масса тела есть мера содержащейся в нем энергии». Если воспользоваться современными обозначениями, то этот вывод выражается формулой

$$E_0 = mc^2.$$

Собственно символ E_0 фигурирует уже в первой фразе, с которой начинается доказательство: «Пусть в системе (x, y, z) находится покоящееся тело, энергия которого, отнесенная к системе (x, y, z) , равна E_0 ». Тело это излучает две плоские световые волны с равными энергиями $L/2$ в противоположных направлениях. Рассматривая этот процесс в системе, движущейся со скоростью v , используя то обстоятельство, что в этой системе суммарная энергия фотонов равна $L(\gamma - 1)$, и приравнивая ее к разности кинетических энергий тела до и после испускания, Эйнштейн приходит к выводу, что «если тело отдает энергию L в виде излучения, то его масса уменьшается на L/V^2 », т. е. $\Delta m = \Delta E_0/c^2$. Таким образом, в этой работе введено понятие энергии покоя тела и установлена эквивалентность массы тела и энергии покоя.

15. «Обобщенная формула Пуанкаре». Если в работе 1905 г. Эйнштейн был вполне четок, то в его последующей статье [9], вышедшей в 1906 г., эта четкость несколько размывается. Ссылаясь на упоминавшуюся нами выше работу Пуанкаре 1900 г., Эйнштейн предлагает более наглядное доказательство вывода Пуанкаре и утверждает, что каждой энергии E соответствует инерция E/V^2 (инертная масса E/V^2 , где V — скорость света), он приписывает «электромагнитному полю плотность массы (ρ_e), которая отличается от плотности энергии множителем $1/V^2$ ». Вместе с тем, из текста статьи [9] видно, что он считает эти утверждения развитием своей работы 1905 г. И хотя в статье [10], вышедшей в 1907 г. Эйнштейн вновь четко говорит об эквивалентности массы и энергии покоя тела (§ 11), тем не менее водораздела между релятивистской формулой $E_0 = mc^2$ и дорелятивистской формулой $E = mc^2$ он не проводит, а в статье [11] «О влиянии силы тяжести на распространение света» он пишет: «...Если приращение энергии составляет E , то приращение инертной массы равно E/c^2 ».

В конце 10-х годов существенную роль в создании современного единого четырехмерного пространственно-временного формализма теории относительности сыграли работы Планка [12, 13] и Минковского [14]. Примерно в то же самое время в статьях Льюиса и Толмена [15, 16] на

трон теории относительности была окончательно возведена «дорелятивистская масса», равная E/c^2 . Она получила титул «релятивистской массы» и, что самое печальное, узурпировала имя просто «массы». А истинная масса попала в положение Золушки и получила кличку «масса покоя». В основу работ Льюиса и Толмена легли ньютоново определение импульса $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ и закон сохранения «массы», а по существу закон сохранения энергии, поделенной на c^2 .

Поразительно, что в литературе по теории относительности описанный нами «дворцовый переворот» остается незамеченным, и развитие теории относительности изображается как логически последовательный процесс. В частности, физики-историки (см., например, книги [3, 7, 17, 18]) не отмечают принципиального различия между статьей Эйнштейна [8], с одной стороны, и статьями Пуанкаре [4] и Эйнштейна [9] — с другой.

Как-то мне попалась на глаза карикатура, изображавшая процесс научного творчества. Ученый, со спины похожий на Эйнштейна, пишет, стоя у доски. Он написал $E = ma^2$ и перечеркнул косым крестом, ниже — $E = mb^2$ и снова перечеркнул косым крестом, и, наконец, еще ниже $E = mc^2$. При всей своей анекдотичности, этот рисунок, может быть, ближе к истине, чем хрестоматийное описание процесса научного творчества как непрерывного логического развития.

Я не случайно упомянул Золушку. Масса, растущая со скоростью, — это было по-настоящему непонятно и символизировало глубину и величие науки и завораживало воображение. Что по сравнению с ней обычная масса, такая простая, такая понятная!

16. Тысяча и две книги. Название этого раздела условно в том смысле, что полное число книг, обсуждающих теорию относительности, мне неизвестно. Наверняка оно превосходит несколько сотен, а возможно, и тысячу. Но две книги, появившиеся в начале 20-х годов, необходимо выделить особо. Обе они очень знамениты и почитаются не одним поколением физиков. Первая — энциклопедическая монография 20-летнего студента Вольфганга Паули «Теория относительности» [19], вышедшая в 1921 г. Вторая — «Сущность теории относительности» [20], опубликованная в 1922 г. самим создателем специальной и общей теории — Альбертом Эйнштейном. Вопрос о связи энергии и массы в этих двух книгах изложен кардинально по-разному.

Паули решительно отбрасывает, как устаревшие, продольную и поперечную массы (а с ними и формулу $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$), но считает «целесообразным» пользоваться формулой $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$, а следовательно, и понятием массы, зависящей от скорости, которому он посвящает ряд параграфов. Много места он уделяет «закону эквивалентности массы и энергии» или, как он его называет, «закону инертности энергий любого вида», согласно которому «всякой энергии соответствует масса $m = E/c^2$ ».

В отличие от Паули, Эйнштейн буквой m называет обычную массу. Выражая через m и скорость тела четырехмерный вектор энергии-импульса, Эйнштейн затем (рассматривает покоящееся тело и приходит к заключению, «что энергия E_0 тела в состоянии покоя равна его массе». Следует заметить, что выше в качестве единицы скорости он принимает c . Далее он пишет: «Если бы мы выбирали в качестве единицы времени секунду, мы получили бы

$$E_0 = mc^2. \quad (44)$$

Масса и энергия, таким образом, сходны по существу — это только различные выражения одного и того же. Масса тела не постоянна; она меняется с его энергией». Однозначный смысл двум последним фра-

зам придают вводные слова «таким образом» и то обстоятельство, что они следуют непосредственно за уравнением $E_0=mc^2$. Итак, массы, зависящей от скорости, в книге «Сущность теории относительности» нет.

Возможно, что если бы Эйнштейн более подробно и последовательно прокомментировал свое уравнение $E_0=mc^2$, то уравнение $E=mc^2$ исчезло бы из литературы уже в 20-х годах. Но он этого не сделал, и большинство последующих авторов пошли вслед за Паули, и масса, зависящая от скорости, заполонила большинство научно-популярных книг и брошюр, энциклопедий, школьных и вузовских учебников по общей физике, а также монографии, в том числе и книги выдающихся физиков, специально посвященные теории относительности.

Одной из первых учебных монографий, в которой теория относительности была изложена последовательно релятивистски, была «Теория поля» Ландау и Лифшица [22]. За ней последовал ряд других книг.

Важное место в последовательно релятивистском четырехмерном формализме квантовой теории поля занял метод диаграмм Фейнмана, созданный им в середине этого столетия [23]. Но традиция использования массы, зависящей от скорости, оказалась столь живучей, что в своих знаменитых лекциях, опубликованных в (начале 60-х годов [22], Фейнман положил ее в основу глав, посвященных теории относительности. Правда, обсуждение массы, зависящей от скорости, заканчивается в главе 16 такими двумя фразами:

«Как это ни странно, формула $m=m_0/\sqrt{1-(v^2/c^2)}$ очень редко употребляется. Вместо этого незаменимыми оказываются два соотношения, которые легко доказать:

$$E^2 - p^2c^2 = M_0^2c^4 \quad (16.13)$$

и

$$pc = \frac{Ev}{c}. \quad (16.14'')$$

В последней лекции, опубликованной при его жизни (она прочитана в 1986 г., посвящена Дираку и называется «Почему существуют античастицы») [24] Фейнман не упоминает ни о массе, зависящей от скорости, ни о массе покоя, а говорит просто о массе и обозначает ее m .

17. Импринтинг и массовая культура. Почему формула $m=E/c^2$ так живуча? Полного объяснения я дать не могу. Но мне кажется, что раковую роль тут играет научно-популярная литература. Именно из нее мы черпаем наши первые впечатления о теории относительности.

В этологии есть понятие импринтинга. Пример импринтинга — научение цыплят следовать за курицей, происходящее в течение короткого периода после их рождения. Если в этот период цыпленку подsunуть движущуюся детскую игрушку, он в дальнейшем будет следовать за игрушкой, а не за курицей. Из многочисленных наблюдений известно, что результат импринтинга не поддается в дальнейшем изменению.

Конечно, дети, а тем более юноши, не цыплята. И, став студентами, они могут выучить теорию относительности в ковариантной форме, так сказать, «по Ландау и Лифшицу» без массы, зависящей от скорости и всей сопутствующей ей нелепицы. Но когда, став взрослыми, они начинают писать брошюры и учебники для юношества, вот тут и срабатывает импринтинг.

Формула $E=mc^2$ уже давно стала элементом массовой культуры. Это придает ей особую живучесть. Садясь писать о теории относитель-

ности, многие авторы исходят из того, что читатель уже знаком с этой формулой, и стараются использовать это знакомство. Так возникает самоподдерживающийся процесс.

18. Почему плохо называть массой E/c^2 . Иногда кто-нибудь из моих друзей-физиков говорит мне: «Ну что ты привязался к этой релятивистской массе и массе покоя? В конце концов, от того, что некую комбинацию букв обозначат какой-то одной буквой и назовут каким-нибудь словом или двумя, ничего страшного произойти не может. Ведь даже пользуясь этими, пусть архаичными, понятиями, инженеры правильно рассчитывают релятивистские ускорители. Главное, чтобы в формулах не было математических ошибок».

Конечно, можно пользоваться формулами и не понимая полностью их физического смысла, и можно делать правильные расчеты, имея искаженное представление о сути науки, которую эти формулы представляют. Но, во-первых, искаженные представления могут рано или поздно привести к ошибочному результату в какой-нибудь нестандартной ситуации. А, во-вторых, ясное понимание простых и красивых основ науки важнее, чем бездумная подстановка чисел в формулы.

Теория относительности проста и прекрасна, а ее изложение на языке двух масс запутано и безобразно. Формулы $E^2 - \mathbf{p}^2 c^2 = m^2 c^4$ и $\mathbf{p} = E\mathbf{v}/c^2$ (я пользуюсь сейчас единицами, в которых $c=1$) являются одними из самых ясных, красивых и мощных формул физики. Вообще, понятия лоренцева вектора и лоренцева скаляра очень важны, поскольку они отражают замечательную симметрию природы.

С другой стороны, формула $E=mc^2$ (я опять полагаю $c=1$) безобразна, поскольку представляет собой крайне неудачное обозначение энергии E еще одной буквой и термином, причем буквой и термином, с которыми в физике связано другое важное понятие. Единственным оправданием этой формулы является оправдание историческое: в начале века она помогла творцам теории относительности создать эту теорию. В историческом плане эту формулу и все, связанное с ней, можно рассматривать как остатки строительных лесов, использовавшихся при постройке прекрасного здания современной науки. А если судить по литературе, то сегодня она выглядит чуть ли не как главный портал этого здания.

Если первый аргумент против $E=mc^2$ можно назвать эстетическим: «прекрасное против безобразного», то второй можно назвать этическим. Обучение читателя этой формуле обычно сопряжено с тем, что его обманывают, скрывая от него, по крайней мере, часть истины и провоцируя в его уме неоправданные иллюзии.

Во-первых, от неопытного читателя скрывают, что формула эта основана на произвольном предположении, что ньютоново определение импульса $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ является естественным в релятивистской области.

Во-вторых, у него неявно создают иллюзию, что величина E/c^2 является универсальной мерой инертности и что, в частности, пропорциональности инертной массы величине v достаточно, чтобы массивное тело нельзя было ускорить до скорости света, даже если его ускорение определяется формулой $\mathbf{a} = \mathbf{F}/m$. Но из

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F}{m_0} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2} \quad (18.1)$$

следует, что

$$\int_0^c dv \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} = \frac{1}{m_0} \int_0^T F dt. \quad (18.2)$$

Считая силу F постоянной, мы легко находим, что время T , за которое тело достигло бы скорости c , равно

$$T = \frac{\pi m_0}{2Fc}. \quad (18.3)$$

Этот ошибочный результат связан с тем, что в формулу $a=F/m$ надо подставлять не «релятивистскую массу», а «продольную массу», пропорциональную γ^3 , про которую современные авторы, как правило, не вспоминают.

В-третьих, читателю внушают иллюзию, что величина E/c^2 является универсальной гравитационной массой. В действительности, как мы видели, в релятивистском случае, в отличие от нерелятивистского, универсальной гравитационной массы нет: сила, действующая на горизонтально летящий фотон, в 2 раза больше, чем на летящий вертикально.

В-четвертых, называя эту формулу именем Эйнштейна, от читателя скрывают истинную формулу Эйнштейна: $E_0 = mc^2$.

Третий аргумент можно назвать философским. Ведь на дефиниции $E = mc^2$ основаны десятки страниц глубокомысленных философских рассуждений о полной эквивалентности массы и энергии, о существовании единой сущности «масс-энергий» и т. д., в то же время, согласно теории относительности, действительно, любой массе отвечает энергия, но отнюдь не наоборот: не любой энергии отвечает масса. Так что полной эквивалентности массы и энергии нет.

Четвертый аргумент—терминологический. Литература по теории относительности содержит такую путаницу в обозначениях и терминологии, что напоминает город, в котором транспорт подчиняется одновременно правилам и правостороннего, и левостороннего движения. Например, в Большой Советской Энциклопедии, в различных физических энциклопедиях и справочниках буквой m обозначают массу и релятивистскую массу; обычную массу иногда называют массой, но чаще массой покоя, релятивистскую массу называют также массой движения, но часто называют просто массой. В одних статьях авторы придерживаются в основном последовательно релятивистской терминологии, в других — последовательно архаичной. Трудно придется начинающему читателю, который захочет сопоставить, скажем, статью «масса» со статьей «относительности теории».

То же смешение обозначений и терминов можно найти и во многих учебниках и монографиях. И вся эта путаница процветает в то время, как в теории относительности по существу есть всего лишь один термин: масса, а все остальные — «от лукавого».

Пятый аргумент — педагогический. Ни школьник, ни школьный учитель, ни студент младших курсов, который догматически заучил, что масса тела растет с его скоростью, не сможет по-настоящему понять сущность теории относительности, если не потратит затем значительных усилий на его переучивание.

Тот, кто в дальнейшем не стал профессиональным физиком-релятивистом, как правило, имеет самые превратные представления о массе и энергии. Порою формула $m = m_0 [1 - (v^2/c^2)]^{-1/2}$ является единственным, что остается у них в памяти, наряду, разумеется, с формулой $E = mc^2$.

Ясно, что любой самостоятельно думающий ученик должен испытывать интеллектуальный дискомфорт, изучая по стандартному школьному учебнику теорию относительности.

19. «Папа, а масса действительно зависит от скорости?» Так называется статья К. Адлера [25], опубликованная в «Американском журнале физики» в 1987 г. Вопрос, вынесенный в заглавие, был задан автору его сыном. Ответ был: «Нет!», «Впрочем, да», «На

самом деле нет, но не говори об этом своему учителю». На следующий день сын прекратил заниматься физикой.

К. Адлер лишет, что понятие релятивистской массы с каждым годом играет все меньшую роль в преподавании специальной теории относительности. Он иллюстрирует это утверждение цитатами из четырех последовательных изданий широко распространенного в США учебника «Университетская физика», с 1963-го по 1982 г.

Говоря о взглядах Эйнштейна, Адлер приводит отрывок из неопубликованного письма Эйнштейна Линкольну Барнетту, написанного в 1948 г.:

«Нехорошо вводить понятие массы тела $M = m[1 - (v^2/c^2)]^{-1/2}$, для которого нельзя дать ясного определения. Лучше не вводить никакой другой массы, кроме «массы покоя» m . Вместо того, чтобы вводить M , лучше привести выражение для импульса и энергии движущегося тела» *).

В историческом плане Адлер рассматривает релятивистскую массу как наследие пререлятивистских теорий Лоренца и Пуанкаре. Он дает критику этого понятия и выражает оптимизм в связи с уменьшением его распространенности.

20. «Физика в школе». Так случилось, что в том же 1987 г., когда вышла статья Адлера, мне пришлось работать в составе комиссии, которую создало бывшее Министерство просвещения СССР для определения победителей всесоюзного конкурса на лучшие учебники по физике. Ознакомившись примерно с двумя десятками представленных учебников, я был поражен тем, что во всех них масса, зависящая от скорости, трактовалась как один из центральных пунктов теории относительности.

Мое удивление еще больше возросло, когда обнаружилось, что большинство членов комиссии — педагоги и методисты — вообще не слышали о том, что существует какая-то иная точка зрения. В импровизированном коротком докладе я рассказал им о двух основных формулах $E^2 - \mathbf{p}^2 c^2 = m^2 c^4$ и $\mathbf{p} = (E/c^2)\mathbf{v}$. И тогда кто-то из них сказал: «Теперь об этом знаете Вы и знаем мы, но больше никто не знает. Вы должны написать статью о массе для журнала «Физика в школе». Тогда об этом узнают 100000 школьных учителей физики».

Я несколько легкомысленно, как выяснилось впоследствии, заверил их, что все изложенное мною известно не только всем физикам-профессорам, но и студентам непедагогических вузов. Но написать статью обещал.

Через несколько дней, встретив на очередном заседании комиссии заместителя главного редактора журнала «Физика в школе», я расска-

*) В связи с отрывком из письма Барнетту уместно привести отрывок из «Автобиографических заметок» Эйнштейна [26], которые были опубликованы в 1949 г. и в томе 4 Собрания научных трудов следуют непосредственно за Предисловием к книге Л. Барнетта «Вселенная и д-р Эйнштейн». В заметках, вспоминая о начальном этапе работы по созданию релятивистской теории тяготения, Эйнштейн пишет: «... теория должна была соединить в себе следующие вещи:

1) из общих соображений частной теории относительности было ясно, что инертная масса физической системы при увеличении полной энергии (в частности, при увеличении кинетической энергии) должна возрастать;

2) из очень точных опытов ... было эмпирически известно с очень большой точностью, что тяжелая масса тела в точности равна его инертной массе.»

Этот отрывок подтверждает, что при создании общей теории относительности понятие массы, растущей с увеличением кинетической энергии, служило для Эйнштейна отправной точкой. Возможно, он указывает также на то, что, упоминая в 1949 г. это понятие без всяких оговорок, он был не вполне последователен. Возможно, он считал, что так он будет понятен большему числу читателей.

зал ей о возникшем предложении и спросил ее, готов ли журнал заказать мне статью о понятии массы в теории относительности. Ответа не было месяца два, а потом моя собеседница позвонила мне и показала, что редколлегия решила такую статью не заказывать. Видимо, сработал импринтинг, о котором я писал выше.

Этот отказ только укрепил мое убеждение в необходимости такой статьи. Работая над ней, я изучил более ста книг и около полусотни статей. Увидел, что школьные учебники не намного хуже вузовских, заинтересовался историей вопроса. Материал разрастался, работа затягивала меня. И конца ей видно не было.

И тогда я решил сесть и написать этот краткий текст, отложив в отдельную папку подробный список литературы и листки с разбором различных статей и книг.

Время не ждет. Ежегодно миллионами экземпляров тиражируются книги, которые вбивают в головы подрастающих поколений ложные представления о теории относительности. Этот процесс необходимо остановить.

Я благодарен членам конкурсной комиссии, инициировавшим написание этой статьи. Я также благодарен за полезные обсуждения и замечания Б. М. Болотовскому, М. Б. Волошину, П. А. Крупичкому, И. С. Цукерману.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Thomson J. J. // *Phil. Mag.* 1881. V. 11. P. 229.
2. Einstein A. // *Ann. d. Phys.* 1905. Bd 17. S. 891; перевод: Эйнштейн А. Собрание научных трудов.— М.: Наука, 1965.— Т. 1. С. 7 (далее цит. как СНТ).
3. Pais A. *Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*.— Oxford: Clarendon Press, 1982.
4. Poincare H. // *Lorentz Festschrift*.—Archieve Neerland, 1900.—V. 5. P. 252.
5. Lorentz H. // *Proc. Roy. Acad. Sci. Amsterdam*. 1899. V. 1. P. 427.
6. Lorentz H. A. // *Ibidem*. 1904. V. 6. P. 809; переводы://1) Принцип относительности: Сб. работ классиков релятивизма/Г. А. Лоренц, А. Пуанкаре, А. Эйнштейн, Г. Минковский.— Под ред. В. К. Фредерикса, Д. Д. Иваненко.— Л., ОНТИ, 1935.—С. 76; 2) Принцип относительности: Сб. работ по специальной теории относительности/Сост. А. А. Тяпкин.— М.: Атомиздат, 1973.— С. 67.
7. Miller A. I., *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905—1911)*.— Addison-Wesley, 1981.
8. Einstein A. // *Ann. d. Phys.* 1905. Bd 18. S. 639; перевод://СНТ — 1965.— Т. 1. С. 36.
9. Einstein A. // *Ibidem*. 1906. Bd 20. S. 371; перевод://*Ibidem*. [8].—С. 39.
10. Einstein A. // *Ibidem*. 1907. Bd 23. S. 371; перевод://*Ibidem*.— С. 53.
- [11] Einstein A. // *Ibidem*. 1911. Bd 35. S. 898; перевод://*Ibidem*.— С. 165.
12. Planck M. // *Verhandl. Deutsch. Phys. Ges.* 1906. Bd. 4. S. 136; перевод://Планк М. Избранные труды.— М.: Наука, 1975.— С. 445.
13. Planck M. // *Sitzungsber. Akad. Wiss. Berlin*. 1907. Bd 13. S. 542; перевод://*Ibidem*. [12].—С. 467.
14. Minkowski H. // *Phys. Zs.* 1909. B. 20. S. 104; переводы://как для работы [6].— С. 181; 167.
15. Lewis G., Tolman R. // *Phil. Mag.* 1909. V. 18. P. 510.
16. Tolman R. // *Ibidem*. 1912. V. 23. P. 375.
17. Jammer M. *Concepts of Mass in Classical and Modern Physics*.— Cambridge: Harvard Univ. Press. 1961; перевод: Джеммер М. Понятие массы в классической и современной физике/Пер. и комментарии Н. Ф. Овчинникова.— М.: Прогресс, 1967.
18. Whittaker E. A. *History of the Theories of Aether and Electricity*. V. 2.— London: Nelson, 1953; перевод://как для работы [6], 2).—С. 205.—Обсуждение вопроса о массе см. с. 226 и далее.
19. Pauli W. *Relativitäts Theorie* // *EncykI. Math. Wiss.* Bd 19. Leipzig: Teubner, 1921; переводы: //Паули В. Теория относительности.— М.; Л.: Гостехиздат, 1947; Пер. с нем. В. Л. Гинзбурга, Л. М. Левина.— М.: Наука, 1973.—2-е изд. исправлено и дополнено по англ. изданию 1958 г.
20. Einstein A. *The Meaning of Relativity: Four Lectures Delivered at Princeton University*.— May 1921; перевод://СНТ.— Т. 2. С. 5; кроме того перевод этой книги вышел отдельным изданием: Эйнштейн А. Сущность теории относительности.— М.: ИЛ, 1955.

- [21] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля.— М.: Гостехиздат, 1955.
22. Feynman R.//Phys. Rev. 1949. V. 76. P. 749, 769; переводы://Новейшее развитие квантовой электродинамики/ Пер. А. М. Бродского под ред. Д. Д. Иваненко.— М.: ИЛ, 1954.—С. 138, 161.
23. Feynman R., Leighton R., Sands M. The Feynman Lectures on Physics.— Addison-Wesley, 1963, 1964.—V. 1. Chs/15, 16; V. 2. Ch. 28; перевод: Фейнман, Лейтон, Сэндс. Фейнмановские лекции по физике.— М., 1961—1966.—Вып. 2, гл. 15, 16; вып. 6, гл. 28.
24. Feynman R. P.//The reason for antiparticles//Elementary Particles and the Laws of Physics; The 1986. Dirac Memorial Lectures.— Cambridge; New York; New Rochelle; Melbourne: Sydney: Cambridge Univ. Press, 1987.— P. 1; перевод://УФН. 1989. T. 157. C. 163.
25. Adler C.//Am. J. Phys. 1987. V. 55. P. 739.
26. Einstein A. Autobiographical Notes//Albert Einstein: Philosopher-Scientist/Ed. by P. A. Schlipp.—Evanston, 1949; перевод://СНТ.— 1966.—Т. 4. С. 259.