

О ПОНЯТИИ МЕРЫ ИНЕРТНОСТИ В СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ¹

С. А. Васильев

Сайты www.nonmaterial.pochta.ru и www.nonmaterial.narod.ru

В последние годы отрицается существование релятивистской массы и её эквивалентность энергии в рамках специальной теории относительности СТО. Релятивистская масса изымается из учебников и книг по СТО. В статье проводится анализ этого отрицания. По определению, масса есть мера инертности. Поэтому всюду, где существует инертность, обязана существовать мера этой инертности, то есть масса. При релятивистских скоростях инертность существует. Следовательно, в СТО обязана существовать релятивистская масса. В статье показано, что выводы сторонников отрицания возникают в результате нарушения требований корректности. Основатели СТО были правы изначально. При корректном подходе, релятивистская масса возвращается в СТО, является в СТО мерой инертности и эквивалентна гравитационной массе, но является в СТО не скаляром, а компонентой 4-вектора. Поскольку релятивистская масса является компонентой 4-вектора, фундаментальная эквивалентность меры инертности и энергии справедлива при любых скоростях (меньших или равных скорости света). Упомянутое отрицание не безобидно для науки, поскольку оно закрывают дорогу к некоторым фундаментальным исследованиям и порождает сумбур в головах учащихся.

1. Цель работы. Соотношение Эйнштейна

$$m = \frac{E}{c^2}, \quad (1)$$

стало подвергаться отрицанию в дальнейшем в специальной теории относительности СТО, где m – релятивистская масса тела, E – его энергия, c – скорость света. Наиболее последовательно и полно Концепция оппонентов выражена в статьях [1, 2]. Согласно этой Концепции [1, 2]:

1. Соотношение (1) не действительно и не имеет физического смысла, так как релятивистская масса не имеет смысла (буду говорить далее просто «масса»);
2. Имеет смысл только соотношение для массы покоя и энергии покоя

$$m_0 = \frac{E_0}{c^2} \quad (2)$$

а Эйнштейн сам впоследствии отказался от соотношения (1), если его понимать в контексте его выступлений, здесь m_0 и E_0 – масса покоя и энергия покоя, соответственно;

3. Релятивистская масса не играет роль ни меры инертности, ни гравитационной массы;
4. Из всех масс, только масса покоя есть инвариант преобразований Лоренца. Масса покоя системы не взаимодействующих, свободно летящих частиц зависит от углов между импульсами частиц. В частности [2], имеет место парадокс системы фотонов: масса покоя «системы двух фотонов, с энергией E у каждого, равна $2E/c^2$, если они летят в противоположные стороны, и равна нулю, если они летят в одну сторону. Это очень непривычно для человека, впервые сталкивающегося с теорией относительности, но таков факт».

При этом пункт 4, в рамках этой Позиции, методологически связывается с пунктами 1-3. Согласно [2], формула (1) «неоднократно применялась и к безмассовому фотону, создавая сумбур в головах учащихся: с одной стороны, фотон безмассов, а с другой – у него есть масса». Изложенная Позиция широко утвердилась, вплоть, до изъятия релятивистской массы из школьных учебников физики в России (по настоянию Л. Б. Окуня [1, 2]). Согласно обзору [3], то же самое произошло в ряде других стран. Большинство современных книг по СТО

¹ Это перевод на русский язык статьи Sergey A. Vasiliev «On the Notion of the Measure of Inertia in the Special Relativity Theory», Applied Physics Research, vol. 4, № 2, 2012, p. 136 – 143, doi:10.5539/apr.v4n2p136, URL: <http://dx.doi.org/10.5539/apr.v4n2p136>.

придерживаются этой Концепции 1 - 4, но существуют и альтернативные концепции относительно эквивалентности массы и энергии [3].

Между тем, Концепция 1 – 4 не так неизбежна, как могло бы показаться. Поэтому необходимо дать критическую оценку Концепции 1 - 4. Цель настоящей статьи есть показать, что все пункты Концепции 1 - 4 аннулируются, если при выводе этих пунктов не нарушать требования корректности, что должно способствовать устранению сумбура и путаницы из голов учащихся. Всюду далее, для краткости, будем называть малыми скоростями, скорости, много меньшие скорости света, а релятивистскими скоростями все иные скорости, меньшие или равные c .

2. Принцип существования массы и требования корректности. Почти всё зависит от того, как понимать термин «масса». По определению, масса – это мера инертности. Именно так рассматривается масса в настоящей статье. Поэтому сформулируем принцип существования массы: всюду, где существует инертность, должна существовать мера этой инертности, то есть, масса. При релятивистских скоростях инертность существует. Следовательно, релятивистская масса должна существовать. Для понимания ошибочности Концепции 1 - 4, следующее имеет решающее значение: при переходе от классической к релятивистской механике, нельзя априори требовать, чтобы мера инертности – масса – была скаляром, чтобы вектор силы F и вектор ускорения a , вызванного этой силой, были параллельны, чтобы масса определялась делением модуля силы F на модуль ускорения a . Данные требования не накладываются априори и в классической механике, а следует там из множества экспериментов, обобщенных вторым законом Ньютона. Но классическая механика «ничего не знает» о том, что реально происходит при релятивистских скоростях, то есть за пределами применимости классической механики. Следовательно, нельзя априори переносить the above положения из классической механики в механику релятивистскую. Чтобы, при релятивистских скоростях, вопрос о скалярности или нескалярности массы, о параллельности или непараллельности векторов F и a , о смысле отношения модулей силы и ускорения в СТО решить корректно, необходимо опираться либо на прямые измерения физических величин (в частности, F и a) при релятивистских скоростях, либо на уравнения СТО, следующие из других прямых экспериментов (по фиксации постоянства скорости света), но вопрос никак не решать априорно. И многое другое нельзя априорно переносить из классической в релятивистскую механику, например, второй закон Ньютона. В классической механике, и второй закон Ньютона, и скалярность массы являются чисто экспериментальными фактами, к тому же не имеющими никакого объяснения. Так почему же второй закон Ньютона не переносят априорно из классической в релятивистскую механику, но модифицируют его известным образом, а скалярность массы иногда переносят? Этому нет разумного объяснения. Указанные выше запреты на априорный перенос будем называть требованиями корректности.

Из сказанного ясно: поскольку инертность существует при релятивистских скоростях, то обязана существовать релятивистская масса. А какой будет релятивистская масса – скаляром, вектором, тензором – зависит от трансформаций законов Ньютона и некоторых других соотношений при выходе за пределы справедливости классической механики. Нескалярность массы может не вписываться в некоторые теории. Но, если нескалярность массы будет следовать из экспериментов или из уравнений, базирующихся на экспериментах, автор склонен отдавать приоритет Природе. Ведь только так физика может приближаться к истине.

При обосновании Концепции 1 - 4, все the above требования корректности нарушены. При попытках определения релятивистской массы, масса априорно полагалась скаляром², а, для определения массы в релятивистской механике, использовался второй закон Ньютона из классической механики [1, 2], то есть просто делили модуль силы на модуль ускорения (значит, априорно считалось, что масса имеет смысл только при параллельности векторов F и a). В результате нарушений требований корректности, выводы о бессмысленности релятивистской массы, о несправедливости фундаментального закона $E = mc^2$ и о

² Это можно было бы ещё как-то понять, если бы масса была мерой не инертности, а некоторой мерой количества вещества, инвариантного относительно преобразований Лоренца.

справедливости всех пунктов 1 – 4 были получены. Сторонники Концепции 1 - 4, очевидно, вошли в противоречие с принципом существования массы. Причём, парадокс системы фотонов возник как артефакт, то есть как результат не совсем корректного построения парадокса (см. подробнее ниже). Как раз наоборот: больше парадоксов физического смысла возникает при отрицании существования релятивистской массы.

3. Парадоксы Концепции 1 – 4. Концепция 1 - 4 приводит к следующим противоречивым неадекватностям физического смысла. Согласно Концепции 1 – 4, бегущие электромагнитные волны могли бы иметь, только массу покоя. Но электромагнитные волны не могут остановиться и находиться в покое. Значит, согласно Концепции 1 – 4, электромагнитные волны и фотоны не имеют никакой массы. Но для отражения фотона требуется передать фотону импульс. Значит, фотоны имеют инертность. Получается так: инертность есть, а меры инертности нет, гравитационное воздействие на фотоны есть, а гравитационной массы у фотонов нет. Да и для всякой частицы с ненулевой массой покоя m_0 возникает та же неадекватность: частица имеет инертность своего движения, но, в соответствии с Позицией, не имеет во время движения меры этой инертности. Или, как известно [4], масса покоящегося тела, состоящего из частиц, увеличивается при нарастании скоростей движений частиц, то есть, кинетическая энергия частиц вносит вклад в меру инертности тела, но, согласно Концепции 1 – 4, кинетическая энергия почему-то не вносит вклад в меру инертности самих частиц. Список неадекватностей, вытекающих из Концепции 1 – 4, можно продолжать.

Эйнштейн изначально был прав. В настоящей работе приводится релятивистское определение меры инертности. В результате, устраняется парадокс системы фотонов, исчезают странности физического смысла и нарушения принципа существования массы. При релятивистском определении понятия меры инертности, релятивистская масса m играет в СТО роль меры инертности и меры гравитационной массы при любых скоростях (меньших или равных c). Энергии движения частиц вносят вклад в их массы. Электромагнитные волны и фотоны имеют релятивистскую массу, гравитационное поле воздействует на них в соответствии с их гравитационной массой, эквивалентной мере инертности.

4. Существование релятивистской массы. Целью релятивистской механики является обобщение правил классической механики на случай релятивистских скоростей. Если последовательно руководствоваться этой целью, и в силу принципа существования массы, можно и необходимо классическое понятие меры инертности обобщить в СТО на случай релятивистских скоростей. Поэтому релятивистская масса оказывается неотъемлемой частью СТО. Следовательно, необходимо искать релятивистскую меру инертности, а не сосредотачиваться на исследованиях исключительно того, является или нет отношение модулей силы и ускорения релятивистской массой. Её поиск с помощью деления модуля силы на модуль ускорения не увенчался успехом [1, 2]. Следовательно, необходимо искать меру инертности в СТО другим способом. При этом не требуется изобретать новые формулы СТО. Достаточно использовать известные уравнения СТО, проистекающие из прямых экспериментов и принципа относительности. Инертность проявляется в двух связях: 1) в связи силы F и ускорения a ; 2) в связи импульса p и скорости³ v . Суть дела состоит не в том, является или нет результат деления модуля силы на модуль ускорения мерой инертности в СТО, что исследуется в работах [1, 2], а в поиске такой меры инертности, которая однозначно определяет ускорение a при заданной силе F , или импульс p - при заданной скорости v . Чтобы найти конкретный вид релятивистской меры инертности - релятивистской массы m , достаточно определить её по правилу (1) и показать, что определённая таким способом релятивистская масса действительно является мерой инертности.

Убедимся, что, определённая данным способом релятивистская масса m частицы, во-первых, есть мера её инертности в СТО, во-вторых, эквивалентна её гравитационной массе в СТО, в-третьих, подчиняется равенству

$$m = \gamma m_0 \quad \text{при } m_0 > 0, \quad (3)$$

³ Чем больше инертность физического тела, тем изменение его скорости должно быть меньше при передаче определённого импульса физическому телу.

введённому для релятивистской массы создателями СТО, где

$$\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad \boldsymbol{\beta} \equiv \frac{\mathbf{v}}{c}, \quad \beta \equiv |\boldsymbol{\beta}| = \frac{v}{c}, \quad (4)$$

\mathbf{v} - вектор скорости частицы, $v \equiv |\mathbf{v}|$.

Действительно, уравнения релятивистской механики свободной частицы имеют вид [3]

$$E^2 - c^2 \mathbf{p}^2 = m_0^2 c^4, \quad (5)$$

$$\mathbf{p} = \frac{E}{c^2} \mathbf{v} \quad (6)$$

Здесь \mathbf{p} – вектор импульса частицы. Эти уравнения верны и при нулевой массе покоя m_0 .

Инертность частицы проявляется, в частности, при передаче частице импульса. При этом роль меры инертности частицы играет множитель, стоящий в выражении (6) для её импульса \mathbf{p} перед скоростью \mathbf{v} частицы⁴. Данный множитель в выражении (6) есть величина E/c^2 . Значит, определение (1) действительно выражает меру инертности в релятивистской механике. Причём, подстановка (6) в (5) даёт соотношение

$$E^2(1-\beta^2) = m_0^2 c^4, \quad (7)$$

а с учётом определения (1) получаем формулу (3). Кроме того, вопреки Концепции 1 – 4, в силу формулы (1), взаимосвязь релятивистской меры инертности и энергии ($E = mc^2$), оказывается справедливой как при малых, так и при релятивистских скоростях, что и требовалось показать в отношении инертной массы. Энергия есть компонента 4-вектора энергии-импульса. Следовательно, и релятивистская масса есть не скаляр, а компонента вектора, что соответствует the above требованиям корректности⁵. Строго говоря, и при малых скоростях, релятивистская масса m остаётся компонентой вектора, но изменяется столь слабо, что практически неотличима от скаляра m_0 . Используя соображение из работы [4], приходим к выводу о справедливости сделанных выводов и для сложного тела [4]: *«Подчеркнём, что хотя мы говорим здесь о «частице», но её «элементарность» нигде не используется. Поэтому полученные формулы в равной степени применимы и к любому сложному телу, состоящему из многих частиц, причём под массой m_0 надо понимать полную массу покоя тела, а под скоростью – скорость его движения как целого.»* - конец цитаты.

5. О нарушениях требований корректности. В работе [2] априорно утверждается: «mass is a relativistic scalar while energy is a 4-vector component». Это есть первое нарушение требований корректности.

Далее, с учётом формул (3), (4), второй закон Ньютона классической механики

$$\frac{\mathbf{F}}{m_0} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} \equiv \mathbf{a}, \quad (8)$$

трансформируется в СТО к виду [1, 3]

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt} = \gamma m_0 \mathbf{a} + \gamma^3 m_0 (\boldsymbol{\beta}, \mathbf{a}) \boldsymbol{\beta}, \quad (9)$$

или, что тоже,

$$\mathbf{F} - (\mathbf{F}, \boldsymbol{\beta}) \boldsymbol{\beta} = \gamma m_0 \mathbf{a}, \quad (10)$$

где круглые скобки с запятой посередине означают скалярное произведение векторов. Согласно работе [1]: *«Несмотря на необычность уравнения (9) с точки зрения ньютоновой механики, а вернее, именно благодаря этой необычности, это уравнение правильно*

⁴ Ведь, чем больше этот множитель, тем больше инертность частицы, то есть, тем меньше изменение скорости частицы при передаче частице определённого импульса.

⁵ В принципе, исследователь может определять релятивистскую меру инертности неоднозначно. Например, любая функция $f(m)$ от массы m может служить мерой инертности, если функция $f(m)$ стремится к m_0 , когда скорость \mathbf{v} стремится к нулю, и если между функцией $f(m)$ и массой m есть взаимно однозначное соответствие. Но, вряд ли, удобно использовать иную меру инертности, нежели величина m .

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 $\mathbf{F} = \gamma m_0 \mathbf{a}$, если же $\mathbf{F} \parallel \mathbf{v}$, то $\mathbf{F} = \gamma^3 m_0 \mathbf{a}$. 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.» - конец цитаты. Как видим, в рамках Позиции 1 - 4, для определения понятия релятивистской меры инертности априорно используется нерелятивистский закон Ньютона (8) - масса априорно определяется делением величины силы на величину ускорения. Это есть второе, наиболее существенное, нарушение требований корректности.

Из вышеуказанной подмены релятивистского закона Ньютона (9) его нерелятивистским аналогом (8) проистекают отрицание релятивистской массы, противоречие с принципом существования массы и принципиально неверные выводы, описанные в пунктах 1 – 3 первого раздела статьи (о гравитационной массе см. ниже). Из приведённых выше цитат из работ [1, 2] хорошо видно, что сторонники Концепции 1 – 4 проводят поиск релятивистской меры инертности априорно так, будто, при выходе за пределы справедливости классической механики, нет расширения физических понятий (будто вне указанных пределов, по-прежнему, только отношение силы и ускорения должно однозначно определять массу).

6. Релятивистская масса как мера инертности в релятивистском обобщении второго закона Ньютона. С учётом определения (1), уравнение (9) допускает его переадресацию в форму, аналогичную классическому закону Ньютона (8),

$$\frac{\mathbf{F}}{m} = \mathbf{W}(\boldsymbol{\beta}; \mathbf{a}), \quad (11)$$

где

$$\mathbf{W}(\boldsymbol{\beta}; \mathbf{a}) \equiv \mathbf{a} + \gamma^2(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{a})\boldsymbol{\beta}. \quad (12)$$

Таким образом, хотя закон Ньютона изменяется при переходе к релятивистским скоростям, но сохраняется его общая структура: левая часть уравнений (8), (11) есть результат деления силы на величину m_0 или m , а правая часть этих уравнений не зависит ни от \mathbf{F} , ни от m_0 или m . В классической механике отношение \mathbf{F}/m_0 однозначно определяет ускорение \mathbf{a} частицы, строго говоря, только при нулевой скорости частицы через классический закон Ньютона (8). В релятивистской механике отношение \mathbf{F}/m однозначно определяет ускорение \mathbf{a} при заданной как нулевой, так и любой ненулевой скорости \mathbf{v} частицы (меньшей c) через релятивистский закон Ньютона (11). Поэтому определённое равенством (1) релятивистская масса m является мерой инертности, в том числе, и с точки зрения связи силы \mathbf{F} и ускорения \mathbf{a} , вызываемого этой силой. Законы природы расширяются при переходе от классической к релятивистской механике. Поэтому вполне естественно, что, в отличие от классической механики, в СТО ускорение зависит не только от отношения силы и меры инертности, но зависит ещё от скорости частицы, благодаря вкладу члена $\gamma^2(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{a})\boldsymbol{\beta}$ в равенство (12).

При этом нарушается правило параллельности силы и ускорения - ускорение имеет компоненту, параллельную силе, но, кроме того, приобретает компоненту, параллельную скорости \mathbf{v} частицы, что легко видеть, учитывая вклад слагаемого $(\mathbf{F}, \boldsymbol{\beta})\boldsymbol{\beta}$ в формуле (10). Физический смысл этого известен и понятен. Происходит как бы «снос» ускорения в направлении скорости. Последнее естественно, поскольку преобразования Лоренца не изменяют пространственные координаты, перпендикулярные скорости, но изменяют только одну пространственную координату, а именно – параллельную скорости. В этом смысле возникает выделенное направление (направление скорости), куда и «сносится» ускорение.

7. Об эквивалентности массы и энергии. Как указано выше, формула $E = mc^2$ связи массы и энергии, справедлива в СТО при любых скоростях (меньших или равных c). Согласно работе [1]: «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». Возможно, формула $m = E/c^2$ может показаться безобразной, но лишь до тех пор, пока это есть всего лишь обозначение. Правда, при этом остаётся непонятным, почему, согласно работе [1], соотношение $m_0 = E_0/c^2$ не безобразно. Ведь, с величиной m_0 , по-прежнему, «в физике связано другое важное понятие», нежели понятие энергии E_0 . Однако, начиная с момента, когда показано, что величина m есть мера инертности и компонента 4-вектора, формула $m = E/c^2$ не безобразна, а выражает фундаментальный физический закон: энергия (которая, в конечном счёте, есть способность совершать работу) однозначно определяет меру инертности, и наоборот. Начиная с данного момента, упомянутая в цитате литература права: формула $m = E/c^2$ действительно представляет собой главный портал СТО. Когда будет понято, почему физически разнородные качества - энергия E и мера инертности m - оказываются взаимно однозначно связанными, откроется новый горизонт понимания физической реальности. Видимо, этот закон означает, по сути, что существует некая единая физическая субстанция, которая порождает и свойство материи иметь энергию, и свойство материи иметь инертность. Тогда отвергать указанный закон, означает отвергать фундаментальное направление физических исследований и исключать из рассмотрения существенные физические свойства. Тогда Концепция 1 - 4 не безобидна для науки.

8. О пункте 4 Концепции 1 – 4. Легко видеть, что, при корректном определении (1) релятивистской массы, релятивистская масса системы свободных частиц (быть может и фотонов) всегда равна сумме релятивистских масс частиц, независимо от направлений импульсов частиц, а парадокс системы фотонов автоматически исключается. Это следует непосредственно из определения (1), если учесть, что энергия системы свободных частиц равна сумме энергий частиц⁶.

Согласно пункту 4 Концепции 1 – 4, из всех масс, только масса покоя есть инвариант преобразований Лоренца. Пусть \mathbf{v}_0 есть нулевая скорость некоторой частицы ($\mathbf{v}_0 = 0$), а \mathbf{v}_1 есть любая, но фиксированная скорость этой частицы, $|\mathbf{v}_1| < c$. Релятивистская масса частицы m зависит от её скорости \mathbf{v} по правилу (3). Другими словами, величина m есть функция скорости \mathbf{v} , $m = m(\mathbf{v})$. В любой инерциальной системе отсчёта S , по определению, масса покоя m_0 есть релятивистская масса $m(\mathbf{v}_0)$ при фиксированной, нулевой скорости \mathbf{v}_0 частицы, $m_0 \equiv m(\mathbf{v}_0)$. В любой инерциальной системе отсчёта S , определим массу m_1 при любой, но фиксированной скорости \mathbf{v}_1 по правилу $m_1 \equiv m(\mathbf{v}_1)$. Если в каждой системе S принудительно останавливать частицу, то во всех системах S масса частицы будет одинакова и равна массе покоя частицы $m_0 \equiv m(\mathbf{v}_0)$. Только в этом смысле, масса покоя m_0 инвариантна относительно преобразований Лоренца. Но, очевидно, если в каждой системе S принудительно заставлять частицу двигаться с любой, но одной и той же, скоростью \mathbf{v}_1 , то во всех системах S масса частицы снова будет одинакова, и равна массе m_1 , $m_1 \equiv m(\mathbf{v}_1)$. Следовательно, любая масса m_1 при любой, но фиксированной, скорости \mathbf{v}_1 есть такой же инвариант преобразований Лоренца, как и масса покоя m_0 , взятая при фиксированной нулевой скорости. Следовательно, массы m_0 и m_1

⁶ Применяя здесь формулу (1) к анализу системы свободных частиц, мы получаем результат формально. Чтобы формальный результат приобрёл физический смысл, необходимо сначала определить понятие движения системы независимых частиц, как единого целого. (Иначе непонятно, по отношению к какому ускорению рассматривается инертность набора независимых частиц, когда говорят о массе системы независимых частиц.) Для этого можно ввести специальную систему координат, относительно которой физические параметры свободных частиц (их массы, скорости, импульсы, энергии) остаются неизменными – «замороженными», но которая может приобретать ускорение. Такую «замороженную» совокупность координат и частиц, соответствующую выбранному набору частиц, автор называет *соответствующей* системой, или кратко *c-системой*. Тогда ускорение системы свободных частиц (быть может и фотонов) приобретает смысл, как ускорение их c-системы. Суммарная релятивистская масса частиц оказывается массой покоя их c-системы. Ускорение c-системы фотона приводит не к изменению скорости фотона, а к изменению его энергии.

равноправны в специальной теории относительности. (Но это *условные* инварианты преобразований Лоренца, то есть инвариантность массы наблюдается при условии «навязывания» частице одной и той же фиксированной скорости в разных инерциальных системах отсчёта. Если же частице ничего не навязывать, а просто наблюдать её с точки зрения разных инерциальных систем координат S , то масса является не скаляром, а компонентой 4-вектора по отношению к преобразованиям Лоренца.)

9. Об эквивалентности инертной и гравитационной массы. Пусть происходит движение лёгкой частицы массы m (например электрона или фотона) под действием постоянного гравитационного поля тяжёлого, несдвигаемого тела массы M_S , то есть $M_S \gg m$. Тогда, при переходе от классической к релятивистской механике, классический закон тяготения Ньютона

$$\mathbf{F} = -\frac{m_0 G M_S \mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^3} \quad (13)$$

преобразуется к виду [1]:

$$\mathbf{F} = -\frac{G M_S m [(1 + \beta^2) \mathbf{r} - (\mathbf{r}, \boldsymbol{\beta}) \boldsymbol{\beta}]}{|\mathbf{r}|^3}, \quad (14)$$

где $m = E/c^2$ - релятивистская инертная масса частицы с энергией E ; \mathbf{F} - сила гравитационного воздействия на частицу; \mathbf{r} - радиус-вектор, соединяющий частицу и источник поля, направленный от источника; G - гравитационная постоянная; \mathbf{v} - скорость частицы. Согласно работе [1]: *«Если в ньютоновой теории сила гравитационного взаимодействия определяется массами взаимодействующих тел, то в релятивистском случае ситуация значительно сложнее. ... Легко видеть, что для медленного электрона с $\beta \ll 1$ выражение в квадратной скобке сводится к \mathbf{r} , и, учитывая, что $E_0/c^2 = m_0$, мы возвращаемся к нерелятивистской формуле Ньютона. Однако при $\beta \approx 1$ или $\beta = 1$ 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»* - конец цитаты. В процитированной Позии снова, как ранее в отношении инертной массы, для определения релятивистской гравитационной массы частицы используется нерелятивистский закон тяготения (13) и тем самым нарушаются требования корректности. Однако, роль *релятивистской* гравитационной массы состоит вовсе не в том, чтобы однозначно определять гравитационную силу через *нерелятивистский* закон тяготения, а в том, чтобы однозначно определять гравитационную силу через *релятивистский* закон тяготения.

Релятивистская формула (14) превращается в классическую формулу (13) только, когда $\beta = 0$. Стало быть, классическое соотношение (13) правильно определяет гравитационную силу \mathbf{F} , строго говоря, только при нулевой скорости частицы. Пусть радиус-вектор \mathbf{r} есть любой, но фиксированный. Тогда в классической механике инертная масса m_0 однозначно и правильно определяет гравитационную силу \mathbf{F} , строго говоря, только при *нулевой* скорости частицы через классический закон тяготения Ньютона (13). Потому инертная масса m_0 эквивалентна гравитационной массе, строго говоря, только при *нулевой* скорости частицы. В релятивистской механике инертная релятивистская масса m однозначно и правильно определяет гравитационную силу \mathbf{F} при заданной как нулевой, так и любой ненулевой скорости \mathbf{v} частицы (меньшей c) через релятивистский вариант закона тяготения Ньютона (14). Поэтому определённая равенством (1) релятивистская инертная масса m является гравитационной массой при любых скоростях \mathbf{v} частицы (меньших c). Закон тяготения расширился при переходе от классической к релятивистской механике. Поэтому вполне

естественно, что, в отличие от классической механики, в СТО гравитационная сила F зависит не только от гравитационной массы частицы, но зависит ещё от скорости частицы. Благодаря добавлению члена $\beta^2 \mathbf{r} - (\mathbf{r}, \boldsymbol{\beta}) \boldsymbol{\beta}$ в уравнение (14), гравитационная сила приобретает компоненту, параллельную скорости частицы, то есть снова происходит «снос» вдоль скорости, но теперь не ускорения, а гравитационной силы. Согласно опыту развития физики, подобные изменения физических закономерностей классической физики, при выходе за пределы её применимости, являются вполне естественными. Нет смысла пытаться «загонять» добавку $\beta^2 \mathbf{r} - (\mathbf{r}, \boldsymbol{\beta}) \boldsymbol{\beta}$ в гравитационную массу.

10. Выводы. Согласно принципу существования массы, релятивистская мера инертности обязана существовать в СТО. Но, при переходе от классической к релятивистской механике, масса не обязана оставаться скаляром. Согласно проведённым поискам релятивистской меры инертности, релятивистская масса существует в СТО, имеет здесь физический смысл меры инертности, но является не скаляром, а компонентой 4-вектора. Релятивистская масса играет роль меры инертности как в связи между силой и ускорением, вызванным этой силой, так и в связи между импульсом и скоростью. Причём, любая масса частицы m_1 при любой, но фиксированной, скорости v_1 есть такой же инвариант преобразований Лоренца, как и масса покоя m_0 , взятая при фиксированной нулевой скорости (см. раздел 8). Использование релятивистской массы в СТО является последовательным исполнением цели СТО и неотъемлемо от СТО. Поскольку релятивистская масса является компонентой 4-вектора, фундаментальное соотношение $E = mc^2$ между мерой инертности и энергией справедливо при любых скоростях (меньших или равных c). Возможно, это означает, что существует некая единая физическая субстанция, которая порождает и свойство материи иметь энергию, и свойство материи иметь инертность. Удаётся показать, что релятивистская инертная масса играет роль релятивистской гравитационной массы, по крайней мере, в постоянном гравитационном поле.

Принципиально неверные противоположные выводы сторонников Позиции 1 – 4 (раздел 1), получены в результате нарушения требований корректности. При корректном подходе все пункты Позиции 1 – 4 аннулируются, а парадокс системы фотонов не возникает. Концепция 1 – 4 не безобидна для науки. Эта Концепция закрывает дорогу к исследованиям физических причин эквивалентности $E = mc^2$ энергии и меры инертности, причин изменений инертности при вариациях движений физического тела и к изучению смежных вопросов.

Иногда встречается мнение: релятивистскую массу m вводить бесполезно, поскольку по определению (1) она является просто другой мерой энергии. Однако, во-первых, это не сильный аргумент, по крайней мере, до тех пор, пока не сказано: массу покоя m_0 тоже вводить бесполезно, поскольку, в силу фундаментального соотношения (2), она тоже является другой мерой энергии, но теперь энергии покоя. Во-вторых, суть дела не в том, вводить или не вводить обозначение m , а в том, что понятие релятивистской меры инертности необходимо в СТО, и в том, что энергия оказывается мерой этой инертности.

Большинство современных книг по СТО придерживаются Концепции 1 – 4. Поэтому, если учебный процесс не дополнять подобными разъяснениями, у учащихся может возникнуть неполное и искажённое представление о специальной теории относительности.

Автор благодарит профессора И. С. Веселовского и профессора Д. Д. Рабунского за содержательные обсуждения.

Литература

1. Окунь Л. Б., УФН, Т **158**, 511 (1989).
2. Окунь Л. Б., УФН, Т **170**, 1366 (2000).
3. Wong Chee Leong & Yap Kueh Chin Conceptual Development of Einstein's Mass-Energy Relationship. // New Horizons in Education, No 51, May 2005, 56 – 66, <http://www.eric.ed.gov/PDFS/EJ848449.pdf> .
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., *Теория поля*, М.: Наука, 1967.
Landau L D Lifschitz E M - Vol 2 - The Classical Theory of Fields