

# О РЕЛЯТИВИСТСКОМ ПОНЯТИИ МЕРЫ ИНЕРТНОСТИ

С. А. Васильев

Сайты [www.nonmaterial.pochta.ru](http://www.nonmaterial.pochta.ru) и [www.nonmaterial.narod.ru](http://www.nonmaterial.narod.ru)

Выдвинутое Эйнштейном соотношение  $E = mc^2$ , где  $m$  – релятивистская масса, в дальнейшем стало подвергаться сомнениям. Возникло представление, что релятивистская масса не имеет физического смысла и не существует, а существует только масса покоя  $m_0$ . Но масса – это мера инертности. Поэтому всюду, где существует инертность, должна существовать мера этой инертности, то есть, масса. При релятивистских движениях инертность существует. Следовательно, должна существовать и релятивистская масса. В соответствии с этим, в статье показывается необходимость и существование релятивистской массы, как меры инертности и гравитационной массы, устраняются парадокс системы фотонов, неадекватности, вытекающие из отрицания релятивистской массы, а соотношению  $E = mc^2$  возвращается смысл фундаментального закона эквивалентности меры инертности и энергии при любых скоростях (меньших или равных  $c$ ). Последнее, видимо, означает, по сути, что существует некая единая физическая субстанция, которая порождает и свойство материи иметь энергию, и свойство материи иметь инертность.

## 1. Выдвинутое Эйнштейном соотношение

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

где  $m$  – релятивистская масса тела,  $E$  – его энергия,  $c$  – скорость света, в дальнейшем стало подвергаться сомнениям. Наиболее последовательно и полно позиция оппонентов выражена в статьях [1, 2]. Согласно этой Позиции [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, если его понимать в контексте его выступлений, сам впоследствии отказался от соотношения (1), 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], 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». Последнее назовём парадоксом системы фотонов.

При этом пункт 4, в рамках этой Позиции, методологически связывается [1, 2] 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».

Однако, изложенная Позиция спорна. Поэтому снова поставим вопрос: существует ли и имеет ли физический смысл релятивистская масса?

2. Всяду далее, для краткости, будем называть малыми скоростями, скорости, много меньшие скорости света, а релятивистскими скоростями все иные скорости, меньшие или равные  $c$ . По определению, масса – это мера инертности. Поэтому всюду, где существует инертность, должна существовать мера этой инертности, то есть, масса. Назовём последнее принципом существования массы. При релятивистских движениях инертность

есть. Следовательно, в релятивистской механике должна быть мера этой инертности, то есть, релятивистская масса. Описанная выше Позиция оппонентов нарушает принцип существования массы и приводит к противоречивым неадекватностям физического смысла. Действительно, например, бегущие электромагнитные волны могли бы иметь, согласно Позиции, только массу покоя. Но электромагнитные волны не могут остановиться и находиться в покое. Значит, согласно Позиции, 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 [3], 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 Позиции, кинетическая энергия почему-то не вносит вклад в меру инертности самих частиц. Список неадекватностей, вытекающих из Позиции, можно продолжать. Данные неадекватности возникают потому, что в рамках Позиции, при определении понятия меры инертности для релятивистской механики, использовался нерелятивистский закон Ньютона (масса определялась просто делением величины силы на величину ускорения), хотя ясно, что при переходе к релятивистской механике нужно использовать специальное релятивистское определение меры инертности.

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. А формула,  $E = mc^2$ , справедлива при любых скоростях (меньших или равных  $c$ ) и выражает фундаментальный физический закон: энергия (которая, в конечном счёте, есть способность совершать работу) однозначно определяет меру инертности, и наоборот. Когда будет понято, почему физически разнородные качества - энергия  $E$  и мера инертности  $m$  - оказываются взаимно однозначно связанными, откроется новый горизонт понимания физической реальности. Возможно, этот закон означает, по сути, что существует некая единая физическая субстанция, которая порождает и свойство материи иметь энергию, и свойство материи иметь инертность. Если это так, то отвергать указанный закон в рамках Позиции – означает, отвергать фундаментальное направление физических исследований и исключать из рассмотрения существенные физические свойства.

**3.** Пусть релятивистская масса  $m$  определяется равенством (1). Это пока только определение, и ничего больше. Убедимся, что, определённая данным образом релятивистская масса  $m$  частицы, во-первых, есть мера её инертности в СТО, во-вторых, эквивалентна её гравитационной массе в СТО, в-третьих, подчиняется равенству

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

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 или тела,  $v \equiv |\mathbf{v}|$ .

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 при передаче частице импульса. При этом роль меры инертности частицы играет множитель, стоящий в выражении (6) для её импульса  $\mathbf{p}$  перед скоростью  $\mathbf{v}$  частицы<sup>1</sup>. 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, в силу формулы (1), взаимосвязь меры инертности и энергии ( $E = mc^2$ ), оказывается при этом справедливой как при малых, так и при релятивистских скоростях, что и требовалось показать в отношении инертной массы. Используя соображение из работы [3], приходим к выводу о справедливости сделанных выводов и для сложного тела: *«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. Всё выше сказанное автором, практически очевидно. Каким же образом в статьях [1, 2] получены противоположные выводы?

4. Дело в том, что в классической механике масса  $m = m_0 = const$ , а потому закон Ньютона может быть равноправно записан в первой форме

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

или во второй форме

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt}. \quad (9)$$

Вторая форма закона Ньютона (9) остаётся справедливой в СТО. По сути, ею воспользовался автор при определении меры инертности в СТО. Первая форма закона Ньютона (8) видоизменяется в СТО [1, 3]

$$\mathbf{F} = \gamma m_0 \mathbf{a} + \gamma^3 m_0 (\boldsymbol{\beta}, \mathbf{a}) \boldsymbol{\beta}, \quad (10)$$

или, что тоже,

$$\mathbf{F} - (\mathbf{F}, \boldsymbol{\beta}) \boldsymbol{\beta} = \gamma m_0 \mathbf{a}, \quad (11)$$

где круглые скобки с запятой посередине означают скалярное произведение векторов. Первая форма закона Ньютона (10) используется в работах [1, 2]. В соответствии с упомянутой Позцией [1]: *«Несмотря на необычность уравнения (10) 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  $\mathbf{F} = \gamma m_0 \mathbf{a}$ , 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 выше приведённой Позции, для определения понятия релятивистской меры инертности используется нерелятивистский закон Ньютона (8) - масса определяется просто делением величины силы на величину ускорения. Из подмены релятивистского закона Ньютона (10) его нерелятивистским аналогом (8) при определении понятия релятивистской меры инертности, проистекают выводы работ [1, 2] и их противоречие с принципом существования массы.

Действительно, нерелятивистский закон Ньютона (8) справедлив только для малых скоростей ( $\beta \ll 1$ ). Соответственно, данный закон позволяет правильно определить меру

<sup>1</sup> Ведь, чем больше этот множитель, тем больше инертность реакции частицы на передаваемый частице импульс, тем меньше изменение скорости при передаче частице определённого импульса.

инертности только при малых скоростях. Целью релятивистской механики является обобщение правил классической механики на случай релятивистских скоростей. Если последовательно руководствоваться этой целью, классическое понятие меры инертности должно получить в СТО обобщение на случай релятивистских скоростей. Но тогда релятивистское понятие меры инертности нужно выводить из релятивистских уравнений (10), (11), а не из классического закона Ньютона (8). С учётом определения (1), уравнение (10) допускает его перезапись в форму, аналогичную классическому закону Ньютона,

$$\frac{\mathbf{F}}{m} = \mathbf{W}(\boldsymbol{\beta}; \mathbf{a}), \quad (12)$$

где

$$\mathbf{W}(\boldsymbol{\beta}; \mathbf{a}) \equiv \mathbf{a} + \gamma^2(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{a})\boldsymbol{\beta}. \quad (13)$$

Таким образом, хотя закон Ньютона изменяется при переходе к релятивистским скоростям, но сохраняется его общая структура: левая часть уравнений (8), (12) 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  $m$ . Классическая мера инертности – масса покоя  $m_0$  – однозначно определяет ускорение  $\mathbf{a}$  частицы, строго говоря, только при нулевой скорости частицы и заданной силе  $\mathbf{F}$  (через классический закон Ньютона (8)). Релятивистская мера инертности должна однозначно определять ускорение  $\mathbf{a}$  частицы при заданной силе  $\mathbf{F}$  и заданной как нулевой, так и любой ненулевой скорости  $\mathbf{v}$  частицы (меньшей  $c$ ) через релятивистский закон Ньютона (12). Релятивистская мера инертности должна отображать дополнительно ту физическую реальность, что инертность частицы нарастает при увеличении скорости  $\mathbf{v}$ . В уравнении (12) фигурирует величина  $m$ , которая однозначно определяет ускорение  $\mathbf{a}$  частицы при заданной силе  $\mathbf{F}$  и заданной любой скорости частицы  $\mathbf{v}$  (меньшей  $c$ ) через релятивистский закон Ньютона (12). В силу соотношений (3), (4), величина  $m$  нарастает при увеличении скорости  $\mathbf{v}$  частицы и превращается при малых скоростях в старую, добрую меру инертности  $m_0$ . Поэтому величина  $m$  является релятивистской мерой инертности и в рамках первой формы (12) релятивистского закона Ньютона.

Природа устроена так, что её законы могут изменяться при переходе от малых к релятивистским скоростям. В частности, второй закон Ньютона (8), при релятивистских скоростях, преобразуется к виду (10)-(12). В результате, при релятивистских скоростях, изменяются правила соотношений между силой  $\mathbf{F}$ , мерой инертности  $m$  и ускорением  $\mathbf{a}$ . Во-первых, теряется простая обратно пропорциональная зависимость ускорения  $\mathbf{a}$  от массы  $m$ . Ускорение начинает зависеть и от скорости частицы (благодаря вкладу величин  $\boldsymbol{\beta} \equiv \mathbf{v}/c$  и  $\beta$  в формулах (10)-(12)). Во-вторых, нарушается правило параллельности силы и ускорения. При релятивистских скоростях, в силу формулы (11), ускорение имеет компоненту, параллельную силе, но, кроме того, приобретает компоненту, параллельную скорости частицы  $\mathbf{v}$  (вклад слагаемого  $(\mathbf{F}, \boldsymbol{\beta})\boldsymbol{\beta}$  в формуле (11)). 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. В-третьих, мера инертности  $m$ , согласно равенству (1), оказывается не скаляром, а компонентой 4-вектора (энергии-импульса). И в этом нет ничего страшного. Если Природа такова, что, при переходе от малых скоростей к релятивистским скоростям, мера инертности тела становится компонентой 4-вектора, то с этим следует соглашаться и искать причины эквивалентности меры инертности и энергии. Природа имеет приоритет. Из исходных посылов раздела 2, следует необходимость меры инертности в СТО. Но ниоткуда не следует, что мера инертности должна обязательно быть скаляром<sup>2</sup>. Возможно, это не вписывается в некоторые теории, но всё-таки автор склонен отдавать приоритет Природе.

<sup>2</sup> Разумеется, масса  $m$  и при малых скоростях (то есть в классической механике) остаётся компонентой 4-вектора, но изменяется столь слабо при малых изменении скорости, что это практически незаметно. Другими словами, компонента 4-вектора  $m$  в пределах малых скоростей выглядит практически как скаляр.

5. Относительно гравитационной массы ситуация аналогична. В СТО, движение материальной частицы под действием постоянного гравитационного поля (то есть поля тяжёлого, несдвигаемого тела) имеет вид [1]:

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

Здесь  $m = E/c^2$  - релятивистская масса частицы с энергией  $E$ ;  $\mathbf{F}$  - сила гравитационного воздействия на частицу;  $\mathbf{r}$  - радиус-вектор, соединяющий частицу и источник поля, направленный от источника;  $M_s$  - масса источника гравитационного поля;  $G$  - гравитационная постоянная;  $\mathbf{v}$  - скорость частицы,  $v \equiv |\mathbf{v}|$ . Приведём сначала Позицию из статьи [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 Позиции снова, как ранее в отношении инертной массы, для определения релятивистского понятия используется нерелятивистский закон.

Действительно, нерелятивистский закон тяготения получаем, положив в (14)  $\beta = 0$ ,

$$\mathbf{F} = -\frac{m_0 GM_s \mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^3}. \quad (15)$$

Формула (14) даёт так же релятивистские соотношения

$$\mathbf{F} = -\frac{m GM_s \mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^3} \quad \text{при } \mathbf{v} \parallel \mathbf{r}, \quad (16)$$

$$\mathbf{F} = -\frac{(1 + \beta^2) m GM_s \mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^3} \quad \text{при } \mathbf{v} \perp \mathbf{r}. \quad (17)$$

Из сравнения равенств (15), (16), (17) видно, что, согласно Позиции, релятивистская гравитационная масса равна  $m = E/c^2$  при  $\mathbf{v} \parallel \mathbf{r}$  или равна  $(1 + \beta^2)m = (1 + \beta^2)E/c^2$  при  $\mathbf{v} \perp \mathbf{r}$ , если релятивистскую гравитационную массу определять, исходя из нерелятивистского закона тяготения (15), то есть, если определять её как множитель, стоящий перед величиной  $-\frac{GM_s \mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^3}$  в выражении для силы. Это недостаточно последовательно, да и противоречиво.

Нерелятивистское соотношение (15) правильно определяет гравитационную массу только при малых скоростях, когда  $\beta \ll 1$ . Последовательным является определение понятия релятивистской гравитационной массы, исходя из релятивистского закона тяготения (14).

Следовательно, её можно приближённо отождествлять со скаляром  $m_0$  в этих, и только в этих пределах, но не при любых скоростях. Поэтому нигде не идёт речь об отождествлении скаляра и компоненты 4-вектора. Кстати, можно объявить скаляром любую релятивистскую массу  $m(\mathbf{v}_0)$  при любой, но фиксированной скорости  $\mathbf{v}_0$ . Можно тогда переписать всю теорию релятивистских скоростей через скаляр  $m(\mathbf{v}_0)$ , а не через  $m_0$ . Для этого достаточно заменить в теории массу  $m_0$  на величину  $m(\mathbf{v}_0)\sqrt{(1 - \mathbf{v}_0^2/c^2)}$  по правилу (3). Причём, масса  $m_0$  есть масса  $m(\mathbf{v}_0)$  при  $\mathbf{v}_0 = \mathbf{0}$ , то есть,  $m_0 = m(\mathbf{0})$ . Таким образом, величины  $m(\mathbf{v}_0)$  и  $m_0 = m(\mathbf{0})$  в принципе равноправны. Следовательно, объявлять массой только массу покоя  $m_0$  не совсем логично.

Формула (14) допускает следующую трактовку: релятивистская масса частицы  $m$  есть релятивистская гравитационная масса в выражении (14), но при переходе от классического (15) к релятивистскому (14) закону тяготения происходит его изменение. Математически, изменение выражается в замене величины  $\mathbf{r}$ , в числителе формулы тяготения, на величину  $[(1 + \beta^2)\mathbf{r} - (\mathbf{r}, \boldsymbol{\beta})\boldsymbol{\beta}]$ . Физически, изменение выражается, во-первых, в появлении у силы тяготения  $\mathbf{F}$  компоненты, параллельной скорости частицы  $\mathbf{v}$  (благодаря слагаемому  $(\mathbf{r}, \boldsymbol{\beta})\boldsymbol{\beta}$ , где  $\boldsymbol{\beta} \equiv \mathbf{v}/c$ ). Значит, снова, как и в случае с релятивистским вторым законом Ньютона, происходит «снос» в сторону скорости. Во-вторых, сила тяготения  $\mathbf{F}$  зависит в релятивистском случае не только от гравитационной массы частицы, но и от её скорости  $\mathbf{v}$  (благодаря вкладу величин  $\boldsymbol{\beta} \equiv \mathbf{v}/c$  и  $\beta$ ). Однако, правило прямо пропорциональной зависимости силы тяготения  $\mathbf{F}$  от гравитационной массы частицы не нарушается. Согласно опыту развития физики, подобные изменения физических закономерностей классической физики, при выходе за пределы её применимости, являются вполне естественными.

6. Можно показать, что, при корректном определении массы системы свободных частиц, парадокс системы фотонов не возникает. Релятивистская масса системы свободных частиц (быть может и фотонов) всегда равна сумме релятивистских масс частиц, независимо от направлений импульсов частиц<sup>3</sup>.

В итоге, логика данной работы показывает следующее. Понятие релятивистской массы необходимо в СТО. Релятивистская масса существует в СТО и имеет здесь физический смысл меры инертности и гравитационной массы<sup>4</sup>. Использование релятивистской массы в СТО является последовательным исполнением цели СТО и неотъемлемо от СТО. Соотношение  $E = mc^2$  действительно и имеет физический смысл при любых скоростях (меньших или равных  $c$ ). Неточности работ [1, 2], при неудачных попытках определить релятивистские инертную и гравитационную массы, проистекают из неявной подмены релятивистских соотношений их нерелятивистскими аналогами.

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. На самом деле, как кажется автору, окончательно разобраться в сокровенных вопросах понимания массы, можно будет только после выявления причин эквивалентности меры инертности и энергии.

1. Окунь Л. Б., УФН, Т **158**, 511 (1989).
2. Окунь Л. Б., УФН, Т **170**, 1366 (2000).
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., *Теория поля*, М.: Наука, 1967.

<sup>3</sup> Формально это следует непосредственно из определения (1), если учесть, что энергия системы свободных частиц равна сумме энергий частиц. 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.

<sup>4</sup> Это, конечно, не означает обязательно существование релятивистской массы за пределами области применимости СТО.

