

УДК 530.1

**К ВОПРОСУ О МАССЕ****Шалаев Владимир Григорьевич**

генеральный конструктор  
ОП ООО «Электротяжмаш-Привод», Санкт-Петербург  
*author@apriori-journal.ru*

**Аннотация.** В дополнение к специальной теории относительности, вводится в рассмотрение аспект, затрагивающий квантовую природу любого микрообъекта (частицы). Показывается, что физической причиной изменения массы  $m$  частицы в функции релятивистского коэффициента  $\gamma$  является лоренц-сокращение области пространства («потенциальной ямы»), в пределах которой осуществляются характерные для частицы квантовые релятивистские процессы. Разъясняется несостоятельность тезиса о зависимости параметра  $m = E/c^2$  от взаимного направления скорости частицы и действующей на неё (со стороны внешнего поля) силы.

**Ключевые слова:** масса; квантовый объект; система микрочастиц; сила; скорость; ускорение.

---

**TO THE QUESTION OF WEIGHT****Shalaev Vladimir Grigoryevich**

general designer  
OP JSC «Elektrotyazhmash-Privod», St. Petersburg

**Abstract.** In addition to the special theory of relativity, the aspect mentioning the quantum nature of any microobject (particle) is entered into consideration. It is shown that  $\gamma$  Lorentz-reduction of area of space («a potential hole») within which quantum relativistic processes, characteristic for a particle, are carried out is the physical reason of change of mass of  $m$  of a particle as relativistic coefficient. Insolvency of the thesis about dependence of the  $m = E/c^2$  parameter on the mutual direction of speed of a particle and acting on it (is explained from an external field) forces.

**Key words:** weight; quantum object; system of microparticles; force; speed; acceleration.

## 1. Введение

Первая работа Альберта Эйнштейна по специальной теории относительности (СТО) была опубликована в 1905 году. Чуть менее века спустя (в 2000 году) В.Л. Гинсбург нашёл основание для того, чтобы в редакционном комментарии, касающемся опубликования в [1, с. 1363-1371] письма Р.И. Храпко и ответа Л.Б. Окуня, написать: «...единство взглядов в вопросе о массе ещё не достигнуто». И здесь нет ничего удивительного, поскольку в физическую модель (пространственно-временной континуум), которой оперирует СТО, гравитационно-динамическая компонента (масса) естественным образом не вписывается.

Этот недостаток теории способен порождать неадекватное толкование такого фундаментального понятия как масса. Например, в [2, с. 339-342] излагается трактовка, смысл которой сводится к следующему. Релятивистский коэффициент  $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ , входящий в выражение для трёхмерного импульса  $\mathbf{p} = m_0\gamma\mathbf{v}$  частицы, обладающей массой покоя  $m_0$  и скоростью  $\mathbf{v}$ , «... относится к свойствам 4-пространства-времени, а не к внутреннему состоянию частицы». Следовательно, величина  $m = m_0\gamma$ , иногда именуемая релятивистской массой, не имеет физического смысла и, «...ничего не прибавляя по существу, служит источником многих недоразумений». Данная трактовка содержит внутреннее противоречие, поскольку (по определению) импульс задаётся произведением массы частицы на её скорость, тогда как в формуле  $\mathbf{p} = m_0\gamma\mathbf{v}$  присутствует ещё и коэффициент  $\gamma$ , который, как вытекает из приведённых рассуждений, не относится ни к массе частицы, ни к её (трёхмерной) скорости.

Цель работы – показать, что выход из указанного противоречия существует, и лежит он на стыке СТО и квантовой механики. В этой связи в разделе 2 исследован вопрос о массе частицы как квантового объекта. В разделе 3 рассмотрены особенности массы системы частиц, а в разделе 4 подтверждена актуальность параметра  $m = E/c^2$  как меры инер-

ционных и гравитационных свойств материи. В последнем разделе содержится заключение.

## 2. Масса частицы как квантового объекта

В дополнение к СТО, введём в рассмотрение аспект, затрагивающий квантовую природу любой микроскопической частицы. Конкретно, примем во внимание зависимость [3, с. 307]

$$\lambda_0 = \frac{h}{m_0 c}, \quad (1)$$

связывающую массу покоя  $m_0$  частицы вещества с характерным для неё геометрическим параметром – комптоновской длиной волны  $\lambda_0$ . Величиной  $\lambda_0$  определяется протяжённость пространственной области, где происходят квантовые релятивистские переходы. Из всех «разрешённых» принципом неопределённости переходов интерес представляют переходы с минимальным разбросом энергии порядка  $m_0 c^2$ , поскольку интервала времени  $\Delta t = h/m_0 c^2 = \lambda_0/c$  достаточно, чтобы переход с упомянутым разбросом энергии мог быть зафиксирован физическими приборами. Поскольку указанная область является местом существования квантов, то она выступает в роли «потенциальной ямы» ширины  $\lambda_0$ .

Если частица свободно движется со скоростью  $v$ , то ей ставится в соответствие плоская волна де Бройля, которая не является какой-либо материальной волной и рассматривается как волна вероятности [3, с. 89]. Длина волны де Бройля  $\lambda_B$  зависит от скорости  $v$ :  $\lambda_B = h/mv$ , – где  $m = m_0 \gamma = E/c^2$  есть параметр с размерностью массы, пропорциональный полной энергии  $E$  частицы. Чем меньше величина  $v$  отличается от значения  $c$ , тем точнее выполняется равенство

$$\lambda_B = \frac{h}{mc} = \lambda, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – параметр с размерностью длины. Приняв во внимание соотношения (1) и (2), находим:

$$\lambda = \lambda_0 \frac{1}{\gamma}. \quad (3)$$

Как видно, в качестве предела  $\lambda$ , к которому в ультрарелятивистском случае ( $v \rightarrow c$ ) стремится параметр  $\lambda_B$ , выступает лоренц-сокращённая комptonовская длина волны частицы (аналогичная интерпретация содержится в [4, с. 489]. В результате убеждаемся, что параметр  $\lambda$ , и, следовательно, ширина «потенциальной ямы», зависят от скорости частицы. В функции скорости меняется также параметр  $m$ , что наглядно показывает соотношение:

$$m = \frac{h}{\lambda c} = \frac{h}{\lambda_0 c} \gamma. \quad (4)$$

Квантовый переход с разбросом энергии  $mc^2$  осуществляется в течение интервала времени порядка  $\Delta t = h/mc^2 = \lambda/c$ . В инерциальной системе отсчёта (ИСО), относительно которой частица движется со скоростью  $v$ , такой переход может быть зафиксирован физическими приборами. В той же ИСО величина  $m c^2$  отождествляется с энергией ( $E$ ) частицы, а закон пропорциональности между массой и энергией [3, с. 393] позволяет интерпретировать параметр  $m$  как массу частицы. В этой связи необходимо отойти от изложенной в [5, с. 512] концепции, согласно которой массой (то есть, мерой инерционных и гравитационных свойств

частицы) является только инвариант  $m_0$ , и признать, что понятию «масса» отвечает величина  $m$ .

Эвристическая ценность соотношения (4) состоит в том, что оно показывает – изменение массы  $m$  частицы в функции скорости обусловлено лоренц-сокращением «потенциальной ямы» ширины  $\lambda$  – места осуществления квантовых переходов с разбросами энергии порядка  $E$ . Сравнив (1) и (4), получаем другую, хорошо знакомую, формулу:  $m = m_0\gamma$ . Никаких параметров, отражающих корпускулярно-волновую природу частицы, эта формула не содержит, поэтому её физическая информативность существенно уступает соотношению (4).

### 3. Масса системы частиц

Масса любой ультррелятивистской частицы как квантового объекта ограничена сверху планковской величиной  $M^* = (hc/G)^{1/2}$ , где  $G$  – гравитационная постоянная [6, с. 337]. Если же говорить о массе системы частиц, то она не имеет упомянутого ограничения. Действительно, энергия аддитивна [5, с. 515], а поскольку масса пропорциональна энергии, то она тоже обладает свойством аддитивности. Так, масса  $M$  изолированной системы свободных (не взаимодействующих друг с другом) частиц определяется суммой их масс:

$$\sum_i^n m_i = M, \quad (5)$$

– где  $m_i = E_i/c^2$  есть масса  $i$ -той частицы,  $n$  – количество частиц в системе. Понятно, что система, состоящая из очень большого числа частиц, имеет массу  $M \gg M^*$ .

В любой системе есть точка (центр инерции), которая при действии на систему внешних сил «... движется так, как если бы все внешние си-

лы были приложены к этой точке, и масса всей системы была бы сосредоточена в этой точке. При этом ... движение центра инерции совершенно не зависит от точек приложения данных внешних сил» ([7, с. 105]). Приписав упомянутой точке массу  $M$  и результирующий импульс  $\mathbf{P} = \sum_i^n \mathbf{p}_i$  всех частиц системы ( $\mathbf{p}_i$  – импульс  $i$ -той частицы), наблюдатель получает возможность рассматривать систему как одну псевдочастицу, модуль  $V$  скорости которой определяется равенством  $V = P/M$ . Взаимосвязь характерных для псевдочастицы параметров  $M$  и  $M_0$  ( $M_0$  – масса покоя) определяется соотношением  $M = M_0 / \sqrt{1 - V^2/c^2}$ , наглядно показывающим, что масса системы есть величина относительная.

#### 4. Актуальность параметра $m = E/c^2$ как меры инерционных и гравитационных свойств материи

Приведённому выше толкованию параметра  $m$  противоречит изложенное в [5, с. 517] утверждение, где сказано: «... 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 её определить нельзя. К такому же заключению относительно «гравитационной массы» приводит рассмотрение гравитационного взаимодействия». Чтобы показать некорректность этого утверждения и, таким образом, подтвердить актуальность параметра  $m$  как меры инерционных и гравитационных свойств материи, проведём краткий анализ связи между силой и ускорением, а также силой и приращением массы (энергии) в теории относительности.

Основное уравнение релятивистской динамики имеет вид [2, с. 140]:  $d(m\mathbf{v})/dt = \mathbf{F}$ , или, – после дифференцирования по времени –

$$\frac{dm}{dt} \mathbf{v} + m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{F}$  есть действующая на частицу сила,  $m = m_0\gamma = E/c^2$ . Как видно, сила  $\mathbf{F}$  имеет две составляющие –  $(dm/dt)\mathbf{v} = \mathbf{F}_m$  и  $m(d\mathbf{v}/dt) = \mathbf{F}_a$ , из которых  $\mathbf{F}_m$  «работает» на изменение массы частицы, а  $\mathbf{F}_a$  – на изменение её скорости. При этом сила  $\mathbf{F}_m$  коллинеарна с вектором скорости  $\mathbf{v}$ , а сила  $\mathbf{F}_a$  – с вектором ускорения  $d\mathbf{v}/dt = \mathbf{a}$ . С учётом введённых обозначений, уравнение (6) принимает вид:

$$\mathbf{F}_m + \mathbf{F}_a = \mathbf{F}. \quad (7)$$

В графическом представлении – это треугольник векторов  $\mathbf{F}_m$ ,  $\mathbf{F}_a$ ,  $\mathbf{F}$ , которые, в общем случае, не коллинеарны и имеют разные модули. Для удобства дальнейших рассуждений воспользуемся записью уравнения (6) в следующем виде [2, с. 140]:

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F} - \frac{\mathbf{v}}{c^2} (\mathbf{F} \mathbf{v}), \quad (8)$$

и рассмотрим два случая воздействия на частицу полей негравитационного происхождения.

Первый случай: движение заряженной частицы в постоянном магнитном поле – поперёк поля ( $\mathbf{F} \perp \mathbf{v}$ ). Здесь следует принять:  $\mathbf{F}_m = \mathbf{v}(\mathbf{F}\mathbf{v}) / c^2 = 0$ , – поскольку при ортогональности векторов  $\mathbf{F}$  и  $\mathbf{v}$  справедливо равенство  $\mathbf{F}\mathbf{v} = 0$ . Тогда, вместо (8), имеем:

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F} = \mathbf{F}_a. \quad (9)$$

Второй случай: движение заряженной частицы в плоском конденсаторе – по полю ( $\mathbf{F} \parallel \mathbf{v}$ ). В данном случае  $\mathbf{F}_m$ ,  $\mathbf{F}_a$ ,  $\mathbf{F}$  есть сонаправленные векторы, и из (8), с учётом (7), вытекает:

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F}(1-\beta^2) = \mathbf{F}_a, \quad (10)$$

$$\frac{dm}{dt}\mathbf{v} = \mathbf{F}\beta^2 = \mathbf{F}_m. \quad (11)$$

После приведения к скалярному виду, уравнение (11) можно представить и в иной форме:

$$d(mc^2) = Fds, \quad (12)$$

– где  $ds = vdt$  – элементарный путь.

Сравнивая (9) и (10), видим, что масса как мера инертности не зависит от взаимного направления силы и скорости, поскольку в обоих случаях она определяется одной и той же величиной  $m$ . При этом ускорение оказывается не одинаковым:  $\mathbf{a} = \mathbf{F}_a / m = \mathbf{F} / m_0\gamma$  (если  $\mathbf{F} \perp \mathbf{v}$ );  $\mathbf{a} = \mathbf{F}_a / m = \mathbf{F} / m_0\gamma^3$  (если  $\mathbf{F} \parallel \mathbf{v}$ ).

Далее рассмотрим случай движения частицы (имеющей очень малую или даже нулевую массу) в гравитационном поле покоящегося тела, обладающего очень большой массой  $M$ . Согласно общей теории относительности, на частицу действует сила [5, с. 518]:

$$\mathbf{F} = - G \frac{M}{r^3} \frac{E}{c^2} [(1+\beta^2)\mathbf{r} - (\mathbf{r}\boldsymbol{\beta})\boldsymbol{\beta}], \quad (13)$$

– где  $\mathbf{r}$  есть радиус-вектор. Пусть частицей является фотон с энергией  $E$ , движущийся со скоростью  $v=c$  по полю ( $\mathbf{r} \parallel \mathbf{v}$ ). В таких условиях фотон принципиально не может ускориться (это даёт основание принять  $\mathbf{F}_a = 0$ ) и действующая на него сила, определяемая из (13) как



$$\mathbf{F} = - G \frac{M}{r^3} \mathbf{r} \frac{E}{c^2} = \mathbf{F}_m, \quad (14)$$

«работает» исключительно на изменение энергии  $E$ . Возможна запись того же выражения и в иной форме:

$$\mathbf{F} = \mathbf{H} m = \mathbf{F}_m, \quad (15)$$

– где  $\mathbf{H} = -GM\mathbf{r} / r^3$  есть напряжённость гравитационного поля [8, с. 61],  $m = E / c^2$  – величина, играющая роль массы фотона.

Если фотон перемещается поперёк поля ( $\mathbf{r} \perp \mathbf{v}$ ), то под действием силы  $\mathbf{F}_a$  его траектория искривляется и происходит изменение скорости вдоль радиус-вектора  $\mathbf{r}$ . Вместе с этим, под действием силы  $\mathbf{F}_m$  имеет место приращение энергии  $E$ . В данном случае  $(\mathbf{r}\boldsymbol{\beta})\boldsymbol{\beta} = 0$  и, вместо (13), можно записать:

$$\mathbf{F} = - G \frac{M}{r^3} \mathbf{r} \frac{E}{c^2} + \left( -G \frac{M}{r^3} \mathbf{r} \right) \frac{E}{c^2} \beta^2 = \mathbf{F}_m + \mathbf{F}_a, \quad (16)$$

– где  $\beta = 1$ ,

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{H} m, \quad (17)$$

$$\mathbf{F}_a = \mathbf{a} m, \quad (18)$$

$\mathbf{a} = -GM\mathbf{r} / r^3$  – вектор ускорения частицы (фотона) в гравитационном поле.

Итак, говорить об ускорении фотона и наличии у него массы  $m$  как меры инертности имеет смысл только тогда, когда фотон движется поперёк поля. Если, к примеру, строго выполняется условие  $\mathbf{r} \perp \mathbf{v}$ , то, опираясь на соотношение (16) и учитывая сонаправленность векторов  $\mathbf{F}_m$ ,  $\mathbf{F}_a$ ,  $\mathbf{F}$ , убеждаемся, что  $\mathbf{F}_m = \mathbf{F}_a = \mathbf{F} / 2$ . Тогда из (18) прямо вытекает:  $\mathbf{a} = \mathbf{F}_a / m = \mathbf{F} / 2m$ , – то есть, движущийся поперёк поля фотон ускоряется

так, как если бы при действии силы  $\mathbf{F}$  его масса имела значение  $2m$ . В уравнениях (15) и (17) массу  $m$  следует трактовать как меру гравитационных свойств фотона, благодаря которым его энергия  $E$  способна изменяться в зависимости от напряжённости ( $H$ ) гравитационного поля внешнего источника.

## 5. Заключение

Приняв во внимание квантовую природу любой микроскопической частицы, убеждаемся, что пространственно-временной континуум определённым образом влияет на инерционные и гравитационные свойства частицы, характеризующие её массой. Появляется осознание того, что масса относительна и обладает свойством аддитивности.

Масса однозначно определяется как  $m = E/c^2$ ; она не зависит от взаимного направления скорости частицы и действующей на неё силы электрического, магнитного или гравитационного происхождения.

## Список использованных источников

1. УФН. 2000. Т. 170. № 12.
2. Угаров В.А. Специальная теория относительности. М., 1977.
3. Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1984.
4. Тредер Х.-Ю. Проблема физического смысла квантования гравитационных полей // Астрофизика, кванты и теория относительности. М., 1982.
5. Окунь Л.Б. Понятие массы // УФН. 1989. Т. 158. Вып. 3.
6. Горелик Г.Е. Первые шаги квантовой гравитации и планковские величины // Эйнштейновский сборник 1978-1979. М., 1983.
7. Иродов И.Е. Основные законы механики. М.: Высшая школа, 1978.
8. Боулер М. Гравитация и относительность. М., 1979.