СОХРАНЯЕТСЯ ЛИ ЛОРЕНЦ-ИНВАРИАНТНОСТЬ ПРИ БОЛЬШИХ ЭНЕРГИЯХ И ИМПУЛЬСАХ

В.Г. Жотиков

Введение

Одно из основных положений специальной теории относительности (СТО) заключается в том, что физические законы одинаковы для всех наблюдателей, движущихся с постоянной скоростью в любом направлении. Неизменность (инвариантность) физических законов для различных наблюдателей, движущихся с постоянной скоростью в любом направлении, есть отражение свойств симметрии, присущей пространству-времени. Этот вид симметрии пространства-времени принято называть лоренцевой симметрией по имени голландского физика Х.А. Лоренца (H.A. Lorentz, 1853–1928). Инвариантность законов физики относительно данного вида симметрии называют лоренц-инвариантностью этих законов. Если лоренцева симметрия справедлива, то пространство изотропно, т.е. все направления и все равномерные прямолинейные движения в нем эквивалентны, ни одно из них не может быть выделено как особое.

Лоренцева симметрия представляет собой фундаментальную основу не только специальной теории относительности, но и всей современной физики. С ней связывают все релятивистские эффекты. СТО согласуется с результатами экспериментов, и до настоящего времени, несмотря на многочисленные попытки, не удалось пока обнаружить ее нарушений.

Вместе с тем согласно некоторым современным теориям, объединяющим квантовую механику и теорию тяготения, законы СТО могут оказаться нарушенными [1]. Иными словами, речь идет о том, что лоренц-инвариантность (обычная) может оказаться нарушенной при очень высоких (близких к планковским) энергиях и импульсах.

В настоящее время число публикаций, в которых обсуждаются различные механизмы возможного нарушения лоренц-инвариантности, превысило несколько сотен. Справедливости ради, следует отметить, что проблема возможности нарушения лоренц-инвариантности при высоких энергиях и импульсах была сформулирована в работах Д.А. Киржница и В.А. Чечина [2], еще задолго до появления работ Амелино-Камелия, Магейо и Смолина, Шутцхолда и Унру [3]. Обзор экспериментальных данных, которые могли бы служить основанием для поиска возможных нарушений СТО, представлен, например, у Коулмана и Глэшоу, Стекера и Скалли, Костелецки [4].

Основная идея нарушения Лоренц-инвариантности кратко сводится к следующему. Предполагается, что планковский масштаб энергий (импульсов) является своеобразным порогом, за которым должна начинаться новая физика. В качестве альтернативных подходов предлагаются различные модификации классической специальной теории относительности. В этой связи в современной физической литературе даже появился новый термин – «двойная (или деформированная) специальная относительность» (DSR). Популярное изложение этих идей имеется в статье А. Костелецки [5] в специальном выпуске журнала «В мире науки», посвященном 100-летию создания СТО.

В DSR постулируется утверждение, что в дополнение к инвариантной величине, которой в СТО является скорость света c, необходимо существование еще одной инвариантной величины (инвариантного масштаба), роль которой должна играть планковская энергия E_{pl} (импульс) или обратная ей величина, называемая планковской длиной l_{pl}. Согласно DSR частицу невозможно разогнать не только до скорости, превышающей скорость света c, но и до энергии, превышающей энергию Планка E_{pl}. Кроме того, согласно некоторым моделям DSR скорость света очень высокой частоты должна быть больше скорости низкочастотного света. Отметим еще один подход к построению DSR, изложенный в работе Шутцхолда и Унру [6]. В нем предлагается учитывать нелокальность взаимодействий и рассматривать возможную зависимость скорости света от энергии фотонов при энергиях, близких к планковским.

Обзор некоторых последних результатов по данной проблеме, в том числе предложения, касающиеся постановки новых экспериментов по поиску нарушений лоренц-инвариантности имеется, например, в работах Поспелова и Ромалиса; Рассела; Вольфа, Тобара и Луитена [7].

Существует две альтернативы для нарушения лоренц-инвариантности: либо не все инерциальные системы отсчета (при энергиях и импульсах, близких к планковским) являются эквивалентными, либо преобразования от одной системы отсчета к другой оказываются различными («деформированными»). В данной работе мы будем рассматривать вторую из указанных возможностей и обсудим вытекающие из этого физические следствия.

Вывод («деформированных») преобразований Лоренца

Далее мы всюду будем использовать естественную систему единиц, в которой $\hbar = c = 1$. Лоренц-инвариантность, или релятивистская инвариантность (СТО), предполагает следующее. Пространство-время есть 4-мерное пространство Минковского $\mathbf{M}^4{}_1$. Если $x = (x^0, x, y, z) = (t, \vec{x})$, $\vec{x} = (x, y, z)$ – координаты точки (события) в $\mathbf{M}^4{}_1$, тогда при лоренцевых преобразованиях имеем:

1) величина $s^2 = t^2 - \vec{x}^{\,2}$ = инвариант. В СТО она называется квадратом интервала. Аналогично для бесконечно малых интервалов ds инвариантной величиной является ее квадрат $ds^2 = dt^2 - d\vec{x}^{\,2}$. Причем для старого ds и преобразованного ds' интервалов выполняются условия:

а) если $ds^2 > 0$, то $ds'^{\,2} > 0$ (времениподобные интервалы);

б) если $ds^2 = 0$, то $ds'^{\,2} = 0$ (изотропные интервалы);

с) если $ds^2 < 0$, то $ds'^{\,2} < 0$ (пространственноподобные интервалы);

2) скорость света в вакууме c = инвариант;

3) $p^2 = E^2 - \vec{p}^{\,2} = m^2$ = инвариант (m – масса частицы).

Как уже отмечалось, лоренцева симметрия является одним из фундаментальных свойств мира. Поэтому обсудим кратко вопрос: что же следует понимать под термином «нарушение» лоренцевой симметрии (лоренц-инвариантности)?

Лоренцеву симметрию можно разделить на два компонента: симметрию относительно вращений и симметрию относительно скоростей. Пусть имеется два стержня одинаковой длины из различных материалов и двое часов с различными механизмами, но одинаковой скоростью хода. Если лоренц-симметрия является точной, тогда из условия симметрии вращения следует, что если одну пару «стержень и часы» повернуть относительно другой пары, то длины стержней останутся неизменными, а часы будут идти синхронно. В случае симметрии относительно скоростей рассматривается, что произойдет, если одна пара «стержень и часы» будет двигаться с постоянной скоростью относительно другой. В этом случае движущийся стержень должен сократиться, а ход движущихся часов – замедлиться. Сами величины этих изменений будут зависеть от скорости движения.

В СТО пространство и время рассматриваются как единое пространство-время, поэтому оба эти вида симметрии математически почти идентичны. С лоренцевой симметрией тесно связана *CPT*-симметрия (*C* – зарядовое сопряжение, *P* – обращение четности, *T* – обращение времени). Согласно уравнениям квантовой теории поля лоренцева симметрия обеспечивает *CPT*-симметрию.

Нарушение лоренц-инвариантности можно представить как действие некоторого векторного поля. Частицы и силы могут взаимодействовать с ним так же, как заряженные частицы взаимодействуют с электромагнитным полем. В итоге лоренцева симметрия искажается. Не все направления и не все скорости оказываются эквивалентными. Длины двух стержней из разных материалов, которые одинаковы при одной ориентации относительно векторного поля, могут оказаться различными при другой ориентации. Аналогично двое разнородных часов, синхронных при одной ориентации, могут замедлить или ускорить свой ход при другой. Кроме того, при движении и длина стержней, и скорость хода часов могут изменяться по-разному в зависимости от направления скорости движения относительно векторного поля.

В данной работе мы представляем новый подход к решению проблемы возможности нарушения лоренц-инвариантности. Для этого мы начнем с самого простейшего случая и обратим внимание на следующий хорошо известный факт [8]. Уравнения движения инвариантны при замене лагранжиана L на новый L' следующего вида:

$$L = L' + \frac{d}{dt} f\ (q, t), \tag{1}$$

где $\frac{d}{dt} f(q, t)$ – полная производная по времени от функции $f(q, t)$, обобщенных координат q и времени t. Это легко проверяется как прямой подстановкой функции (1) в уравнения Лагранжа, так и непосредственно из интегрального принципа наименьшего действия $\delta S = 0$.

В релятивистской физике (механике и теории поля) имеют дело с лагранжианами, которые должны обладать свойством однородности:

$$L(q, \lambda\dot{q}) = \lambda L(q, \dot{q})$$

для всех $\lambda > 0$. Такие лагранжианы называются параметрическими: значение действия для них зависит только от траектории частицы (и направления движения), но не от параметризации (т.е. от скорости движения).

Ограничимся пока простейшим случаем релятивистской механики. Будем иметь

$$\frac{d}{dt}f(t,\vec{x}) \to \langle u, 4\text{-}grad\, f(x)\rangle. \tag{2}$$

Символ < , > означает скалярное произведение 4-вектора скорости $u = (u_0, \vec{u})$ частицы на 4-градиент скалярной функции $f(x) = f(t, \vec{x})$, а $x = (t, \vec{x})$,

Преобразования (1) представляют собой калибровочные преобразования специального типа. В математике их принято называть преобразованиями Каратеодори [9]. Каратеодори был одним из первых, кто применил их для получения достаточных условий экстремума функционалов действия [10].

Геометрическая теория преобразований Каратеодори построена В.В. Вагнером [11]. Оказывается, что в импульсном пространстве преобразования Каратеодори представляют собой трансляции вида

$$p' = \varepsilon(p - \sigma),\ (\varepsilon = \pm 1), \tag{3}$$

где $p = (p_0, \vec{p}) = (E, \vec{p})$ – «старый» 4-вектор энергии-импульса; $p' = (p'_0, \vec{p}) = (E', \vec{p})$ – «новый» 4-вектор энергии-импульса; а) σ – 4-вектор импульсных трансляций $\sigma = 4\text{-}grad f(x)$. Значение $\varepsilon = -1$ в (3) и далее соответствует операции отражения от центра пространства.

Трансляции в координатном 4-пространстве приводят, как известно, к законам сохранения энергии (инвариантность относительно сдвига по оси времени) или импульса (инвариантность относительно сдвига пространственных координат). Здесь мы имеем дело с другим видом симметрии: трансляциями в импульсном 4-пространстве, который также приводит к новым законам сохранения.

Преобразования (3) индуцируют в координатном пространстве преобразования вида

$$x' = \frac{\varepsilon x}{1 - \langle \sigma, x \rangle},\ (\varepsilon = \pm 1). \tag{4}$$

Совокупность преобразований (3), (4) при $\varepsilon = +1$ называется собственными, а при $\varepsilon = -1$ – несобственными преобразованиями Каратеодори. Мы будем называть их соответственно собственными и несобственными импульсными трансляциями.

В проективной геометрии преобразования (3), (4) называются гомологическими преобразованиями, или, кратко, гомологией. Напомним, что гомологией в проективной геометрии называется автоморфизм проективного пространства (проективной плоскости), при котором одна гиперплоскость (одна прямая) и точно одна точка (центр гомологии) переходят в себя. Эти преобразования образуют группу [12]. Мы будем далее называть эту группу группой импульсных трансляций. Физический смысл этой группы преобразований будет рассмотрен ниже.

Относительно операции сложения 4-импульсов (3) необходимо отметить следующее. Как известно, проективная прямая изоморфна окружности с отождествленными противоположными точками. Поэтому сложение соответствующих компонентов импульсов сводится к операции

$$p_a (+) \sigma_a = p_a + \sigma_a \text{ по модулю } 2\pi / l_{\mathrm{pl}}, \tag{5}$$

где $a = 0, 1, \ldots, 3$, l_{pl} обозначает планковскую длину $l_{\mathrm{pl}} = \sqrt{G} \sim 10^{-33}$ см (G – гравитационная постоянная). Таким образом, складывая импульсы, мы должны оставаться в пределах от $-\pi / l_{\mathrm{pl}}$ до $+\pi / l_{\mathrm{pl}}$. Тогда преобразования в координатном пространстве, выражаемые формулой (4), должны быть периодическими функциями от σ с периодом $2\pi / l_{\mathrm{pl}}$. Соответственно сопряженная к p переменная x должна быть дискретной и принимать значения, кратные элементарной длине l_{pl}.

Мы находим здесь полную аналогию между этими процессами и процессами «переброса импульсов», имеющими место в теории твердого тела, в которой импульс для частиц, движущихся в кристаллической решетке, сохраняется только по модулю $2\pi / b$, где b – постоянная решетки. Импульс $2\pi / b$ передается в этом случае бесконечно тяжелой решетке. В нашем случае импульс $2\pi / l_{\mathrm{pl}}$ передается физическому вакууму.

Заметим, что обычный закон сохранения энергии-импульса в данной модели, вообще говоря, не имеет места. Это есть прямое следствие неоднородности пространства-времени, которое приобретает структуру дискретной решетки. Физически это нарушение можно интерпретировать как поглощение или излучение «квазичастиц», имеющих импульс $2\pi / l_{\mathrm{pl}}$.

Физический смысл группы импульсных трансляций

Ранее нами было введено векторное поле σ как 4-градиент скалярной функции $f(x)$. Последняя имеет физическую размерность действия, т.е. размерность постоянной Планка (углового момента). Это скалярное поле мы будем называть полем Каратеодори. Частицы и силы взаимодействуют с этим полем и между собой, обмениваясь 4-вектором энергии-импульса σ.

Перейдем теперь к обсуждению физического смысла группы импульсных трансляций. Он достаточно очевиден: законы природы (уравнения движения и уравнения состояния) должны иметь один и тот же вид (т.е. должны быть ковариантными) при переходе к новым энергиям и импульсам [13]. Этот принцип можно назвать *принципом относительности в импульсном пространстве*. Ясно, что данный принцип существует в неразрывной связи с принципом относительности СТО.

Произведение группы импульсных трансляций на группу вращений 4-мерного пространства-времени (группу Лоренца) образует центрально-проективную группу преобразований

$$x' = \frac{\varepsilon A x}{1 - <\sigma, x>}, \quad (\varepsilon = \pm 1), \tag{6}$$

где A – матрица 4-вращений. Эта матрица может быть разложена на произведение матриц 3- вращений $\boldsymbol{R}$ и матрицу преобразований Лоренца $\boldsymbol{L}$.

Уравнение (6) представляет собой тензорное уравнение, где x и x' – 4-вектор-столбцы, а σ – 4-ковектор-строка. Будем рассматривать собственные преобразования (6). Очевидно, что при малых энергиях-импульсах и на больших расстояниях (расстояниях, превышающих комптоновскую длину волны частицы) преобразования (6) переходят в «обычные» преобразования Лоренца. Поэтому преобразования (6) можно назвать «деформированными преобразованиями Лоренца» или, что будет правильнее, преобразованиями Лоренца – Каратеодори.

Принцип двойственности, имеющий место в проективной геометрии [14], дает основание говорить о двуединой структуре физического пространства: это пространство-время, состоящее из элементарных событий, плюс энергия-импульс каждого такого элементарного события. Поясним это утверждение на примере двумерной проективной плоскости (двумерного расширенного пространства Минковского).

Проективную плоскость можно рассматривать как совокупность двух множеств, из которых одно состоит из всех точек, другое – из всех прямых. Первое задается множеством контравариантных 2-векторов x, тогда как второе – множеством ковариантных 2-векторов p. Для элементов этих множеств установлены отношения «инцидентность точки с прямой», «разделенность двух пар точек», удовлетворяющие известным аксиомам. При этом прямая не рассматривается как совокупность лежащих на ней точек (и точка не рассматривается как совокупность проходящих через нее прямых). В результате, например, устранение какой-либо прямой из множества прямых вовсе не означает устранение ее точек из множества точек, и наоборот.

Тогда любое проективное преобразование плоскости состоит из двух взаимно однозначных отображений: множества всех точек на себя и множества всех прямых на себя. При этом должно выполняться условие: каждое преобразование сохраняет инцидентность, т.е. переводит инцидентные точку и прямую в инцидентные точку и прямую.

Таким образом, важнейший геометрический смысл проективного принципа двойственности состоит в том, что этот принцип обеспечивает возможность построения на базе обычного проективного пространства нового, более богатого пространства – пространства пар «точка (элементарное событие), описываемое 4-вектором пространства-времени, плюс соответствующий (инцидентный) ей 4-ковектор энергии-импульса, характеризующего данное элементарное событие».

Геометрия такого проективного пространства является метрической геометрией [15]. В частности, имеет место изоморфизм группы гиперболических движений на плоскости и группы проективных преобразований прямой. Это дает основание говорить о существовании в природе своего рода принципа полной относительности, частными, но связанными друг с другом проявлениями которого выступают принцип относительности в пространстве событий СТО и принцип относительности в импульсном пространстве.

В свою очередь, свойства группы преобразований Каратеодори как подгруппы центрально-проективной группы (группы трансляций в импульсном пространстве и гомологии в координатном пространстве) позволяют установить наличие в природе фундаментального масштаба l_{pl} (или обратной ей величины E_{pl}). Этот вопрос требует отдельного рассмотрения. Здесь мы ограничимся лишь краткими комментариями.

Проблема фундаментальной длины, в качестве которой наиболее разумно принять планковскую длину l_{pl} (или обратную ей величину E_{pl}) является одной из существенных проблем не только физики, но и всей философии современного естествознания. Существенный вклад в решение этой проблемы внесен группой ученых из Института философии и права СО РАН.

В нашем случае существование фундаментальной длины (фундаментального масштаба) оказывается одним и свойств используемой геометрии [16].

Здесь уместно напомнить, что в формализме классической СТО существует обычно редко упоминаемая проблема бесконечных значений физических величин, когда скорость объекта приближается к скорости света [17]. Иными словами, все неинвариантные конечные величины, которые описывают объекты, измеряемые в собственной системе отсчета, при скорости движения, приближающейся к световой, должны стремиться относительно другого инерциального наблюдателя либо к нулю, либо к бесконечности. В данном случае эта проблема устраняется. Мы имеем теперь инвариантный масштаб для измерения расстояний (или энергий) всеми инерциальными наблюдателями.

Некоторые свойства преобразований Лоренца – Каратеодори

Нетрудно найти инварианты преобразований (6). Одним из них будет теперь новая величина, которую по аналогии с инвариантом специальной теории относительности $s^2 = t^2 - \vec{x}^2$ можно назвать обобщенным релятивистским интервалом $\widetilde{s}$:

$$\widetilde{s}^2 = \frac{t^2 - \vec{x}^2}{(1 - < p, x >)^2} = \text{инвариант}. \tag{7}$$

Здесь p – 4-вектор энергии-импульса для события в пространстве-времени с координатами $x = (t, \vec{x})$.

Псевдоевклидова (лоренцева) метрика $ds^2 = dt^2 - d\vec{x}^2$ оказывается теперь также неинвариантной. Инвариантом становится построенная из нее новая величина:

$$d\tilde{s}^2 = \frac{dt^2 - d\vec{x}^2}{(1 - < p, x >)^2} = \text{инвариант}. \tag{8}$$

Сам же этот бесконечно малый интервал $d\tilde{s}$ преобразуется по закону

$$d\tilde{s}' = \varepsilon\,(1 - <\sigma, x>)\, d\tilde{s},\ (\varepsilon = \pm 1). \tag{9}$$

Под действием преобразований Лоренца – Каратеодори световой конус переходит в себя: точки светового конуса переводятся в точки этого же конуса. Это означает, что скорость света в вакууме есть инвариант относительно указанных преобразований.

При малых энергиях-импульсах и на расстояниях, превышающих комптоновскую длину волны частицы, интервал (9) переходит в интервал пространства событий СТО, а пространство и время становятся однородным и изотропным пространством-временем. С другой стороны, если параметр преобразований Лоренца (скорость $\vec{u}$ одной системы отсчета относительно другой) стремится к нулю ($\vec{u} \to 0$), преобразования Лоренца – Каратеодори (6) сводятся к преобразованиям Каратеодори.

Отметим еще раз, что введение преобразований Каратеодори потребовало обобщения понятия пространства Минковского $\mathbf{M}^4{}_1$. Вместо эквиаффинного пространства оно должно стать проективным пространством $\mathbf{P}^4$ в котором введено неевклидово мероопределение [18].

Отметим также, что некоторое подтверждение целесообразности замены пространства Минковского на проективное пространство с неевклидовым мероопределением получено в работе группы Дж. Викса [19] в результате обработки данных с космического зонда NASA WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), исследующего анизотропии распределения космического микроволнового фона – реликтового излучения во Вселенной. При этом установлено, что окружающий нас космос может быть не только конечным, замкнутым и сравнительно небольшим по объему, но также может иметь форму трехмерного 12-гранника – додекаэдра с линейным размером $\cong$ 74 млрд световых лет. Имеется в виду так называемая гомологическая сфера, или топологическое пространство Пуанкаре. Причем единственная конечная группа, реализуемая как фундаментальная группа трехмерного пространства Пуанкаре, – это бинарная группа икосаэдра, являющаяся фундаментальной группой пространства додекаэдра – исторически первого примера пространства Пуанкаре.

Несмотря на то что эти результаты требуют подтверждения другими группами исследователей, они представляются весьма обнадеживающими.

Теория относительности и квантовая теория

Соображения и результаты, представленные в предыдущих разделах, оказались созвучными соображениям М. Борна, которые были изложены им в статье «Теория относительности и квантовая теория» [20]. Ниже мы процитируем основные выводы этой работы, имеющие самое непосредственное отношение к полученным результатам.

«Точечные преобразования в x-пространстве являются всего лишь частным случаем; однако имеется другой, столь же простой, как и первый, который может быть описан как точечное преобразование в p-пространстве...

Мне представляется, что точечные преобразования в p-пространстве можно было бы рассмотреть подобным же образом. Такой путь ведет к некоему обобщенному формализму теории относительности в p-пространстве, в котором везде координаты пространство-время и импульс-энергия поменялись местами...

Эти факты в сильной степени наводят на мысль о формулировке "принципа взаимности", в соответствии с которым любой общий закон в x-пространстве имеет "инверсный образ" в p-пространстве, – в первую очередь это относится к законам теории относительности...

Я хочу теперь отметить некоторые простые следствия и численные результаты...

Соответствующие свойства p-пространства таковы: энергетически замкнутая система соответствует замкнутому пространству импульсов с радиусом b, который является максимально возможным импульсом [21]. В литературе имеется несколько попыток ввести подобный максимальный импульс с целью исключить нарушающие общую картину "бесконечности" из квантовой механики. Однако эти попытки следует признать негодными, поскольку они противоречат теории относительности. Эта трудность обходится с помощью нового принципа.

Основное следствие представления о замкнутом p-пространстве сводится к изменению выражения для числа квантовых ячеек в данном элементе фазового пространства. Новая формула имеет много приложений. Следующие величины, которые бесконечны в принятых теориях, становятся теперь конечными: число N квантовых состояний излучения в x-объеме V; нулевая энергия ε излучения в этом объеме; собственная энергия электрона...

Имеются, далее, отступления от законов Планка и Стефана – Больцмана; последний в случае высоких температур напоминает формулу, определяющую количество тепла (теплосодержание) в кристалле с характеристической температурой

$$\theta_0 = 1,63 \cdot 10^{12} \text{ } \textit{град.}$$

Эти отклонения связаны с тем фактом, что давление излучения не равно 1/3 плотности энергии; уравнения Максвелла перестают удовлетворяться при таких плотностях излучения.

Законы кинетической теории газов также претерпевают изменения, которые для газа с молекулярным весом μ начинаются с характерной температуры

$$\theta = \frac{137}{1845}\frac{\theta_0}{\mu} = \frac{1{,}21 \cdot 10^{11}}{\mu} \text{ } \textit{град.}$$

Уравнения состояния сохраняются неизменными, но удельная теплоемкость стремится к нулю при $T \to \infty$.

К интересным результатам ведет приложение нового принципа к вопросу о структуре ядер...

Эти утверждения свидетельствуют о том, что мы имеем дело с чем-то большим, чем простой формализм».

Не имея возможности привести здесь эту замечательную работу М. Борна, полностью, завершим ее цитирование следующим фрагментом, который содержит мысль, не потерявшую своей актуальности и сегодня: «Хотя в настоящее время мы и далеки от того, чтобы иметь последовательную теорию, новый принцип предоставляет в наше распоряжение заманчивую программу исследований».

Заключение

Подведем некоторые итоги. Результаты, полученные в предыдущих разделах, дают основания сформулировать следующие утверждения.

1. Уравнения движения должны сохранять свою форму при переходе от одной инерциальной системы к другой и с соответствующим изменением энергий и импульсов. Это и есть принцип относительности Эйнштейна – Пуанкаре плюс принцип относительности в импульсном пространстве.

2. В природе должны существовать, по крайней мере, три не зависящих от наблюдателей фундаментальных масштаба: скорость света c, постоянная Планка h и планковская энергия E_{pl} (или обратная ей величина – планковская длина l_{pl}). Это необходимо для того, чтобы в физическом пространстве-времени можно было выполнять требуемые измерения физических величин.

По этому поводу уместным будет напомнить соображения Л.Д. Ландау, изложенные в его статье «Фундаментальные проблемы», которая опубликована в сборнике, посвященном памяти В. Паули: «В релятивистской квантовой теории единственными измеримыми величинами являются энергия-импульс и поляризация свободно движущихся частиц» [22]. Тогда знаменитое выражение А. Эйнштейна: «Опыт = Геометрия + Физика» получает тот самый смысл, который вкладывал в него сам создатель теории относительности.

3. Преобразования Лоренца – Каратеодори имеют общий характер и должны быть распространены на все разделы современной физики, в которых имеют дело с высокими плотностями энергии-импульса и малыми расстояниями.

4. Все известные релятивистские эффекты, такие как замедление хода движущихся хода часов, сжатие движущихся тел и др., должны рассматриваться как следствие преобразований Лоренца – Каратеодори, а не в узком смысле – как следствие преобразований Лоренца. Это дает новый стимул к экспериментам по установлению границ справедливости классической СТО.

Таким образом, ответ на вопрос, вынесенный в заголовок данной статьи, может быть следующим. Законы природы таковы, что они должны быть инвариантны при наблюдении за физической системой из разных систем отсчета (т.е. различными наблюдателями), а также при наблюдении за изменением состояния системы из одной системы отсчета (одним и тем же наблюдателем).

Следовательно, в современном изложении у специальной теории относительности должно быть, по крайней мере, два аспекта. *Во-первых*, она должна рассматривать инвариантность (т.е. неизменность) законов природы относительно всех инерциальных наблюдателей. Здесь имеют место преобразования Лоренца. Природа последних – кинематическая. *Во-вторых*, СТО должна рассматривать инвариантность (т.е. неизменность) законов природы при наблюдении за физической системой любым из инерциальных наблюдателей. Сама система может изменять свое состояние (например, она может изменять состояние своего поступательного движения, т.е. ускоряться). Здесь имеют место преобразования Каратеодори. У них уже динамическая природа.

Соответственно под группой релятивистской инвариантности следует понимать группу преобразований Лоренца – Каратеодори, а не ее подгруппу – группу Лоренца (однородную группу Пуанкаре). Поэтому все фундаментальные уравнения физики в дополнение к их инвариантности относительно группы Пуанкаре (неоднородной группы Лоренца) должны быть инвариантными также относительно группы преобразований Каратеодори. Иными словами, все фундаментальные уравнения физики должны быть проверены на инвариантность относительно преобразований Каратеодори. Если некоторые из уравнений окажутся неинвариантными относительно преобразований Каратеодори, то тогда следует применить процедуру их приведения к инвариантному виду [23].

Эту статью представляется возможным закончить словами, которые принадлежат одному из выдающихся ученых прошлого столетия, академику А.Н. Крылову: «Рано или поздно, всякая правильная математическая идея находила применение в том или ином деле».

В заключение автор считает необходимым выразить признательность академикам РАН А.Ф. Андрееву и С.Н. Багаеву за постоянное внимание и поддержку. Отдельная благодарность – В.В. Корухову за любезное ознакомление с результатами исследований по проблеме фундаментальной длины, ведущихся в Институте философии и права СО РАН. Автор благодарит также В.М. Дубовика (ОИЯИ, Дубна) и Р.Ф. Полищука (АКЦ ФИ РАН) за плодотворные дискуссии.

Примечания

1. См.: *Amelino-Camelia G.* // Phys. Lett. – 2001. – V. B 510. – P. 255; *Magueijo J., Smolin L.* // Phys. Rev. Lett. – 2002. – V. 88, No. 19. – P. 190403; *Schutzhold R., Unruh W.G.* // Pis’ma v ZhETF. – 2003. – V. 78, iss. 7. – P. 899.

2. См.: *Киржниц Д.А., Чечин В.А.* Письма в ЖЭТФ. – 1971. – Т. 14. – С. 261; *Они же.* // Ядерная физика. – 1972. – Т. 15. – С. 1051.

3. См.: *Amelino-Camelia G.* // Phys. Lett. – 2001. – V. B 510. – P. 255; *Magueijo J., Smolin L.* // Phys. Rev. Lett. – 2002. – V. 88, No. 19. – P. 190403; *Schutzhold R., Unruh W.G.* // Pis'ma v ZhETF. – 2003. – V. 78, iss. 7. – P. 899.

4. См.: *Coleman S., Glashow S.L.* // Phys. Rev. – 1999. – V. 59. – P. 116008; *Stecker F.W., Scully S.T.* Preprint astro-ph/0412495, Jan. 2005; *Костелецки А.* // В мире науки. – 2004. – № 12 (спец. вып.). – С. 71. (*Kostelecki A.* Scientific American. – 2004. – No. 9).

5. См.: *Костелецки А.* // В мире науки. – 2004. – № 12. – С. 71.

6. См.: *Schutzhold R., Unruh W.G.* // Pis'ma v ZhETF. – 2003. – V. 78, iss. 7. – P. 899.

7. *Pospelov M., Romalis M.* // Physics Today. – July 2004. – P. 40; *Russell N.* // CERN Courier. – Dec. 2004. – P. 27; *Wolf P., Tobar M.E., Luiten A.N.* // Phys. Rev. – 2004. – V. 70. – P. 05102.

8. См., например: *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. – Т. I: Механика. – М., 2001. – С. 12.

9. *Вагнер В.В.* // Докл. АН СССР. – 1945. – Т. 46, № 7. – С. 287; *Жотиков В.Г.* // Труды Международного семинара «Применение и развитие идей Лобачевского в современной физике» (Дубна, 25–27 февраля 2004 г.). – Дубна: ОИЯИ, 2004. – С. 80; *Zhotikov V.G. //* Internation conference on theoretical physics: Abstracts. Supplement (Moscow, Lebedev Institute, 2005). – M., 2005.

10. См.: *Caratheodory C.* Variationsrechenung und Partielle Differentialgleichungen. – Ordnung – Leipzig; Berlin: Verlag und Druck von B. G. Teubner, 1935. – S. 197.

11. См.: *Вагнер В.В.* // Докл. АН СССР. – 1945. – Т. 46, № 7. – С. 287.

12. См.: *Жотиков В.Г.* // Труды Международного семинара «Применение и развитие идей Лобачевского в современной физике» (Дубна, 25–27 февраля 2004 г.). – Дубна: ОИЯИ, 2004. – С. 80; *Zhotikov V.G. //* Internation conference on theoretical physics: Abstracts. Supplement (Moscow, Lebedev Institute, 2005). – M., 2005.

13. Там же.

14. См.: *Розенфельд Б.А.* // Труды семинара по векторному и тензорному анализу. – М., Л., 1950. – Вып. 8. – С. 328.

15. Там же.

16. См.: *Жотиков В.Г.* // Труды Международного семинара «Применение и развитие идей Лобачевского в современной физике» (Дубна, 25–27 февраля 2004 г.). – Дубна: ОИЯИ, 2004. – С. 80; *Zhotikov V.G. //* Internation conference on theoretical physics: Abstracts. Supplement (Moscow, Lebedev Institute, 2005). – M., 2005; *Розенфельд Б.А.* // Труды семинара по векторному и тензорному анализу. – М., Л., 1950. – Вып. 8. – С. 328.

17. См.: *Корухов В.В.* Фундаментальные постоянные и структура пространства-времени. – Новосибирск: РИЦ НГУ, 2002.

18. См.: *Жотиков В.Г.* // Труды Международного семинара «Применение и развитие идей Лобачевского в современной физике» (Дубна, 25–27 февраля 2004 г.). – Дубна: ОИЯИ, 2004. – С. 80; *Zhotikov V.G. //* Internation conference on theoretical physics: Abstracts. Supplement (Moscow, Lebedev Institute, 2005). – M., 2005.

19. См.: *Luminet J.P., Weeks J., Riazielo A. et al.* // Nature. – 2003. – V. 425. – P. 593.

20. См.: *Борн М.* Размышления и воспоминания физика: Сб. статей. – М.: Наука, 1977. – С. 122. (Nature. – 1938. – V. 141. – P. 327).

21. В связи с этим см. формулу (5) и последующий за ней текст.

22. *Ландау Л.Д.* // Теоретическая физика 20 века: Памяти В. Паули / Пер. с англ. под ред. Я.А. Смородинского. – М.: Иностр. лит., 1962. – С. 285. (Theoretical Physics in the Twentieth Century: A Memorial Volume to Wolfgang Pauli / Ed. by M. Fierz and V.F. Weisskopf. – Cambridge, USA, 1961).

23. См.: *Жотиков В.Г.* Геометрия вариационного исчисления и ее приложение к теоретической физике. – Томск, 2002. – С. 283.

Московский физико-технический институт
(Государственный университет), г. Москва

Zhotikov, V.G. **Does Lorentz-invariance hold under large energy and momentum?**

The paper is devoted to the 100th anniversary of Special Relativity. It shows that, in modern view, Lorentz-Caratheodory transformations group rather than that of Lorentz transformations (Poincarй homogeneous group) is taken to be relativistic invariance group. The former includes two sub-groups: Lorentz group and Caratheodory one. The presence in the theory of Caratheodory transformations group guarantees introduction of an invariant quantity – fundamental length. Therefore, all fundamental equations in physics, in addition to their invariance relative to Poincarй transformations group, should be invariant relative to Caratheodory transformations group as well.