

УДК 160.1

**ОБОБЩЕНИЕ КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ:
СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ****Е. А. Безлепкин*

Теория относительности А. Эйнштейна (как специальная, так и общая) обобщает классическую механику и электромагнетизм для случая релятивистских скоростей. В статье показано, что на основе обобщенных математических структур становится возможным объединенное описание разнородных физических явлений, связанных с предшествующими теориями. СТО и ОТО также не только объединяют категории пространства и времени, но и обобщают категорию пространства. Показано, что обобщение категории пространства является доминирующей тенденцией перехода от классической физики к релятивистской.

Ключевые слова: классическая физика, специальная теория относительности, принцип относительности, категория пространства, обобщение, объединение

Релятивистская физика, как и классическая, характеризуется понятиями детерминизма и непрерывности. Главное отличие заключается в области применимости релятивистских физических теорий, которую можно охарактеризовать физической постоянной. При рассмотрении области действия теории относительности становится значимой константа «*c*» (скорость света), значением которой ограничена скорость движения физических объектов.

Поэтому говорят, что теория относительности обобщает классическую механику на случай релятивистских скоростей. Нам кажется, что на основе математического обобщения ключевых понятий СТО (система отсчета, инвариант, принцип относительности) становится возможным объединенное описание физических явлений, которые ранее считались независимыми. С целью доказательства этого утверждения проведем методологический анализ постулатов (принципов) СТО.

* Работа выполнена при поддержке фонда РГНФ проект № 13 – 03 – 00065.

Статья публикуется в авторской редакции.

Прежде чем сформулировать первый принцип – принципа относительности – А. Эйнштейн высказывает следующую предпосылку: «для всех координатных систем, для которых справедливы уравнения механики, справедливы те же самые электродинамические и оптические законы...» [1], которую превращает в принцип: «Законы, по которым изменяются состояния физических систем, не зависят от того, к которой из двух координатных систем, движущихся относительно друг друга равномерно и прямолинейно, эти изменения состояния относятся» [2], или «законы природы не зависят от состояния движения системы отсчета, по крайней мере, если она не ускорена» [3].

Можно видеть, что в этих формулировках характер обобщения связан с распространением принципа Галилея – Ньютона с механических систем на немеханические (электродинамические, а в перспективе – на любые физические системы). Чтобы понять суть обобщения, сопоставим формулировку Эйнштейна с формулировкой Ньютона: «Относительные движения друг по отношению к другу тел, заключенных в каком-либо пространстве, одинаковы, покоится ли это пространство, или движется равномерно и прямолинейно без вращения» [4].

Эти принципы отличаются не только обобщением механических систем на любые другие. Во-первых, Ньютон рассматривает не механические системы, а движение тела (в пространстве): он не рассматривает системы координат и связанные с ними законы. Эйнштейн говорит о системе координат и инвариантности любых законов природы в этих системах. Во-вторых, Эйнштейн обобщает понятие «состояние» на релятивистские явления. В-третьих, принцип относительности является в механике Ньютона следствием из его законов, а в теории Эйнштейна – самостоятельным основополагающим принципом. В-четвертых, Ньютон, вероятно, говорит о движении относительного пространства, в котором заключены тела; по Эйнштейну система координат движется не вместе с пространством, а в пространстве.

Также важно выделение понятия «событие», которое обобщает понятие материальной точки, т.к. событие происходит в момент времени в пространстве; кроме того, «физической реальностью обладает не точка пространства и не момент времени, когда что-либо произошло, а только само событие» [5].

Таким образом, принципы относительности отличаются концептуально (в них входят разные понятия) и функционально (классический принцип из следствия возводится в ранг основополагающего в релятивистской механике). Принцип Эйнштейна можно считать обобщением

принципа Галилея – Ньютона в математическом смысле. По Горскому здесь использован следующий вид обобщения: «обобщение как перенесение закономерностей, действительных для одной предметной области на иные предметные области» [6].

Второй принцип СТО – принцип постоянства скорости света – может быть сформулирован так: «свет в пустоте всегда распространяется с определенной скоростью V , не зависящей от состояния движения излучающего тела» [7]. Эта формулировка соответствует современной.

В связи с этим принципом отметим следующее. «Когда природа исключает какое-либо явление, ее предписание часто принимает форму какого-нибудь закона сохранения» [8]. Постоянство скорости света – это регулятив (запрет), ограничивающий бесконечную скорость распространения световой волны до фиксированной скорости. Этому регулятиву соответствуют модифицированные законы сохранения, называемые инвариантами, или сохраняющимися величинами. Таким образом, второй принцип СТО представляет собой регулятив, кардинально изменяющий описание свойств евклидова пространства.

Обычно считается, что на основе этих принципов Эйнштейн выводит преобразования Лоренца, которые являются обобщением классических преобразований Галилея. Однако для такого вывода требуется добавить еще одно положение – определение синхронизма часов [9].

Согласно Эйнштейну, «пусть в момент t_A по « A -времени» (т.е. по часам, находящимся в некоторой точке A . – *Е.Б.*) луч света выходит из A в B , отражается в момент t_B по « B -времени» от B к A и возвращается назад в A в момент t'_A по « A -времени. Часы в A и B будут идти, по определению, синхронно, если $t_B - t_A = t'_A - t_B$ » [10]. То есть время распространения света из A в B («туда») равно времени распространения света из B в A («обратно»). Именно из совокупности двух постулатов и условия синхронизма часов Эйнштейн выводит преобразования Лоренца, к анализу которых приступим далее.

Начнем с классических преобразований, которые формулируются на основе принципа относительности и принципа дальнего действия (т.е. на предположении о бесконечной скорости распространения взаимодействий, из которого выводится абсолютность времени).

Эйнштейн в статье «Принцип относительности и его следствия» пишет о том, что преобразования Галилея содержат два неявных допущения (гипотезы) «старой» физики. Первое связано с принципом даль-

действия и формулируется так: «мы не имеет права априори предположить, что можно выверить часы двух групп таким образом, что обе координаты времени элементарного события были бы одинаковыми, иными словами, чтобы t было равно t' » [11]. Математически это выражается в виде: $t = t'$. Иными словами, время абсолютно и является одним и тем же для всех инерциальных систем отсчета.

Второе допущение связано с пространственной составляющей преобразований и формулируется так: «конфигурация геометрическая (т.е. измерение движущегося тела движущимся с такой же скоростью масштабom) и конфигурация кинематическая (т.е. измерение движущегося тела покоящимся по отношению к нему масштабom) идентичны» [12]. Допущение говорит о том, что, например, сфера в одной системе отсчета будет также сферой при переходе к другой системе (т.е. не происходит кинематического сокращения). Допуская вторую гипотезу «старая» физика формулирует преобразования Галилея:

$$\begin{aligned}x' &= x + vt \text{ (*)} \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= t\end{aligned}$$

(*) При условии, что две системы отсчета – старая (нестрихованная) и новая (стрихованная) – совмещены и движутся одна относительно другой с постоянной скоростью вдоль оси « x ».

Обратимся к преобразованиям Лоренца:

$$\begin{aligned}t' &= \gamma (t - v/c \uparrow 2x) \\x' &= \gamma (x - vt) \\y' &= y \\z' &= z,\end{aligned}$$

где γ – гамма-фактор, или релятивистское дополнение.

Отметим симметричность вхождения переменных « x » и « t » в первые две формулы. На основе формул преобразований Лоренца Эйнштейн выводит физические следствия, применимые к движущейся системе. Однако с точки зрения принципа относительности обе системы по отношению друг к другу оказываются движущимися.

Во-первых, кинематическая форма (конфигурация) тела будет отличаться от геометрической сокращением размеров в направлении движения.

Во-вторых, часы в движущейся системе будут идти медленнее, чем те же часы, неподвижные по отношению к рассматриваемой системе. Отметим, что физически отыскать покоящуюся систему невозможно.

В-третьих, как следствие конечной скорости распространения взаимодействий выводится существование причинно-следственных связей (например, рождение элементарной частицы во всех системах отсчета происходит раньше ее распада, т.е. одно событие называется причиной, а другое следствием, если они связаны времениподобным интервалом, т.е. взаимодействием, распространяющимся не быстрее, чем со скоростью света).

В-четвертых, при предельном переходе преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея – Ньютона. Следует отметить, что предельный переход «влечет за собой не просто количественное уточнение теории и ее уравнений, но также – и прежде всего – качественное их усложнение, связанное с введением новых представлений и понятий» [13]. Так, при переходе от СТО к классической механике принцип близкого действия заменяется на принцип дальнего действия.

В-пятых, из преобразований Лоренца выходит, что время в разных системах отсчета преобразуется точно таким же образом, как и пространственные координаты, что дает право рассматривать его тоже как координату. Б.Г. Кузнецов пишет: «Реальный смысл трактовки времени в качестве четвертой координаты заключается в том, что реальные события не могут протекать вне времени и всегда обладают четвертым измерением – длительностью во времени» [14].

Такое рассмотрение системы координат дает возможность вывести инвариант (сохраняющуюся величину) теории относительности. Инвариант (интервал) связан с объединением пространства и времени. Пространство и время в классической механике были независимы друг от друга. Поскольку Ньютоном, по сути, использовалась геометрия Евклида, постольку инвариантом являлась формула, следующая из теоремы Пифагора. В СТО используется четырехмерный континуум, инвариант в котором определяется иначе:

$$ds^2 = -d(c^2t^2) + dx^2 + dy^2 + dz^2 = -c^2t^2 +$$

Здесь переменная «скорость света» умножена на переменную «время», чтобы получить размерность «расстояние», ту же размерность, что у координат. Введенной метрике $(- + + +)$ соответствует пространство, называемое псевдоевклидовым.

Чтобы унифицировать полученный линейный элемент следует временную координату ввести симметрично с пространственными координатами, т.е. изменить ее знак. Это можно сделать, положив: $ict = x_4$. Тогда мы приходим к интервалу вида:

$$ds^2 = \sum_{i=1}^4 dx_i^2 .$$

В-шестых, в работе «Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии?» Эйнштейн, основываясь на преобразованиях Лоренца выводит формулу зависимости массы тела от содержащейся в нем энергии, которую можно записать так: $E_0 = mc^2$. «Масса тела есть мера содержащейся в нем энергии; если энергия изменится на величину L , то масса меняется соответственно на величину $L/(9 \cdot 10^{20})$, причем здесь энергия измеряется в эргах, а масса – в граммах [15].

Если рассматривать этот закон с точки зрения обобщения, то, можно сказать, что это – «обобщение за счет объединения двух или нескольких различных законов в один более общий закон» [16]; а именно, объединение двух законов классической физики – закона сохранения энергии и закона сохранения массы – в один закон сохранения массы-энергии. Таким образом, «масса и энергия есть проявление некоторой фундаментальной сущности» [17].

Всякая ли энергия включается в эту зависимость. Ответ, по нашему мнению, кроется в явлении аннигиляции. Как известно, при соединении, например, электрона и позитрона они аннигилируют, оставляя после себя два гамма-кванта, обладающих полной энергией первоначальных частиц. В результате столкновения гамма-квантов с атомами, вся энергия переходит в тепловую. Таким образом, «этот факт показал, что вся энергия покоя электрона обладает потенциальной способностью превращаться в другие формы энергии, например в тепловую» [18]. Оговоримся относительно «полной эквивалентности» этих величин. Как пишет Л.Б. Окунь: «любой массе отвечает энергия, но отнюдь не наоборот: не любой энергии отвечает масса» [19].

Эта формула вместе с другими выводами получена как следствие двух принципов СТО посредством преобразований Лоренца. В методе-

логическом плане, это указывает на то, что СТО – классическая гипотетико-дедуктивная теория, в которой на основе физических принципов и процесса дедукции получаются эмпирически проверяемые следствия о фундаментальных категориях материи.

Теперь перейдем к рассмотрению некоторых математических понятий и структур. Первое понятие – трехмерного пространственно-вектора – вследствие объединения категорий пространства и времени обобщается на понятие четырехмерного пространственно-временного вектора. «Вместо прежнего трехмерного вектора импульса частицы $p = mv$ и независимой величины энергии E , мы имеем теперь “4-импульс”» [20]. О том же А. Салам: «Энергия и импульс (подходящим образом определенные) образуют два аспекта одного и того же (ковариантного) единства» [21]. Поскольку вектор энергии-импульса оказывается инвариантной величиной в четырехмерном мире, постольку появляется объединенный закон сохранения энергии-массы (или энергии-импульса);

Обобщение математических объектов, в частности 4-векторов, продолжается введением понятия тензора. Следует отметить, что в векторной формулировке электродинамики ни электрическое, ни магнитное поле не являются частью 4-вектора; компоненты этих полей только в тензорной формулировке объединяются в более общую структуру – тензор напряженности электромагнитного поля. Поэтому введение тензорного формализма, объединяющего («смешивающего») компоненты рассматриваемых полей, можно считать более глубоким объединением электричества и магнетизма, чем векторные уравнения Максвелла.

Возвращаясь к нашему анализу, следует сказать, что преобразования Лоренца являются схемой (в смысле В.С. Степина) для СТО, поэтому следует далее рассмотреть входящие в них понятия (категории) и их свойства.

Преобразования Лоренца связаны с понятием системы отсчета: они переводят одну систему отсчета в другую. Поэтому основным объектом СТО следует признать это понятие. Система отсчета не характеризуется уравнением движения, а рассматривается с точки зрения инвариантности преобразований. Г.Я. Мякишев замечает: «Специальная теория относительности принадлежит к числу принципов симметрии или инвариантности, которым удовлетворяют различные фундаментальные теории» [22]. Иначе, можно сказать, что «Теория относительности (специальная. – Е.Б.) дает общий критерий допустимости любой

физической теории» [23], а именно: уравнения теории должны быть ковариантны относительно преобразований Лоренца.

В преобразования Лоренца входят понятия: пространственная и временная координаты (пространственно-временной континуум), скорость материальной точки, скорость света (как фундаментальная постоянная).

Первое свойство категории пространства-времени описано А. Эйнштейном: он пишет о том, что преобразования Лоренца «должны быть линейными в силу свойства однородности, которое мы приписываем пространству и времени» [24]. Из этой же цитаты выходит, что свойства категорий пространства и времени должны быть одинаковы, так как равноправно входят в преобразования Лоренца.

Перечислим остальные категории и их свойства.

1) Пространство-время:

- единая (объединенная) и обобщенная категория
- непрерывность (однородность и изотропность)
- детерминизм (однозначная причинность)
- инвариантность (относительность), выраженная законами сохранения

2) Взаимодействие:

- близкодействие

Как уже сказано, СТО не только объединяет категории пространства и времени, но и обобщает категорию пространства. По этому поводу П.К. Рашевский писал: «Псевдоевклидова метрика в пространстве событий носит универсальный характер и объединяет в себе измерение как пространственных, так и временных расстояний» [25], т.е. пространство и время оказываются объединенными в четырехмерный мир.

Опишем как происходит обобщение категории пространства. Переход от классической механики к СТО соответствует в геометрическом аспекте обобщению евклидова пространства на псевдоевклидово пространство (Минковского). Пространство Минковского, ввиду преемственности категорий, сохраняет свойства однородности и изотропности для инерциальных систем отсчета. Редукция пространственно-временного континуума (т.е. переход от псевдоевклидова к евклидову пространству) происходит в пределе при стремлении скорости света к бесконечности ($c \rightarrow \infty$) или при стремлении скорости тела

к нулю ($v_0 \rightarrow 0$). В этих случаях формулы преобразования Лоренца переходят в формулы преобразования Галилея.

Обобщение (как и возможность редукции) пространственно-временных категорий становится возможным за счет математической связи при предельном переходе преобразований Лоренца и Галилея. Эта связь осуществляется общностью понятия инвариантности (интервала) в классической и релятивистской теориях, а также путем введения константы, за счет которой можно совершить предельный переход, – скорости света.

Рассмотрим кратко категорию пространства в общей теории относительности. СТО в виду принципа соответствия является предельным случаем ОТО при переходе в пределе к бесконечно малым областям пространства-времени. Поэтому при описании таких областей используется псевдоевклидово пространство; однако при переходе к конечным областям пространство СТО обобщается на четырехмерное псевдориманово пространство ОТО.

Таким образом, мы имеем следующую цепочку обобщений категории пространства:

- 1) классическая механика использует для описания категории пространства образ плоского, изотропного и однородного пространства Евклида;
- 2) СТО использует обобщение пространства Евклида на искривленное (т.е. неоднородное) четырехмерное пространство-время Минковского;
- 3) ОТО использует обобщение псевдоевклидова пространства-времени на понятие риманова многообразия.

Последнее обобщение связано с изменением компонентов, входящих в интервал СТО.

Инвариант (интервал) в ОТО задается следующим образом:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} ds_\mu ds_\nu,$$

где g_μ – компоненты метрического тензора. В СТО они являются константами, задающими метрику Минковского; в ОТО они становятся переменными и интерпретируются как потенциалы поля.

Их физический смысл состоит в том, что они описывают гравитационное поле относительно заданной системы координат. Их геометрический смысл состоит в том, что они описывают метрические соот-

ношения в пространственно-временном континууме, т.е. его искривление. По этому поводу К. Ланцош писал: «В то время как специальная теория относительности объединила в одном понятии пространство и время, общая теория относительности объединила пространство, время и материю в один геометрический образ – метрическую геометрию риманова типа в четырехмерном мире» [26].

Таким образом, совокупность принципа инвариантности (и его согласование с фундаментальными формулами электромагнитной теории), принципа постоянства скорости света и условия синхронизма, позволили подобрать математическое описание нового пространственно-временного континуума и сохранить преемственность в описании категории пространства рассмотренных теорий.

Примечания

1. *Эйнштейн А.* Собрание научных трудов. Т. I. – М.: Наука, 1965. – С. 7.
2. Там же. – С. 10.
3. Там же. – С. 69.
4. *Ньютон И.* Математические начала натуральной философии. – М.: Наука, 1989. – С. 49.
5. *Эйнштейн А.* Собрание научных трудов. Т. II. – М.: Наука, 1966. – С. 25.
6. *Горский Д.П.* Вопросы абстракции и образования понятий. – Изд-во АН СССР, 1961. – С. 321.
7. *Эйнштейн А.* Собрание... Т. I. – С. 7–8.
8. *Гелл-Манн М.* Элементарные частицы // УФН. – 1958. – №2. – С. 406.
9. *Наберухин Ю.И.* Еще раз о синхронизме часов в специальной теории относительности // Философия науки. – 2002. – № 2 (13). – С. 74.
10. *Эйнштейн А.* Собрание... Т. I. – С. 9.
11. Там же. – С. 150.
12. Там же. – С. 151.
13. *Зельманов А.Л.* Многообразие материального мира и проблема бесконечности Вселенной // Бесконечность и Вселенная. – М.: Мысль, 1969. – С. 295.
14. *Кузнецов Б.Г.* Основы теории относительности и квантовой механики. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – С. 55.
15. *Эйнштейн А.* Собрание... Т. I. – С. 38.
16. *Горский Д. П.* Вопросы абстракции... – С. 323.
17. *Салам А.* Элементарные частицы // УФН. – 1961. – № 5. – С. 141.
18. *Бом Д.* Специальная теория относительности. – М.: Мир, 1967. – С. 117.
19. *Ожнь Л.Б.* Понятие массы // УФН. – 1989. – № 3. – С. 527.
20. *Очерки* развития основных физических идей. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – С. 292.
21. *Салам А.* Элементарные частицы // УФН. – 1961. – № 5. – С. 142.
22. *Мякишев Г.Я.* Общая структура фундаментальных физических теорий и понятие состояния // Физическая теория. – М.: Наука, 1980. – С. 426.

23. Эйнштейн А. Собрание... Т. I. – С. 421.
24. Там же. – С. 14.
25. Раивеский П.К. Риманова геометрия и тензорный анализ. – М.: Наука, 1967. – С. 268.
26. Ланцош К. Вариационные принципы механики. – М.: Мир, 1965. – С. 334.

Дата поступления 19.05.2014

Институт философии и права
СО РАН, г. Новосибирск
evgeny-bezlepkin@mail.ru

Bezlepkin, E.A. Generalization of classical physics: special relativity

Einstein's relativity theory generalizes classical mechanics and electromagnetism for the case of relativistic velocities. The paper shows that generalized mathematical structures form a basis which make possible to carry out the unified description of diverse physical phenomena related to preceding theories. Besides, SR and GR not only unite the categories of space and time but also generalize the category of space. Generalization of the category of space is the dominating trend in transition from classical physics to relativistic one.

Keywords: classical physics, special relativity, relativity principle, category of space, generalization, unification