

ОТ РЕДАКЦИИ

Публикуемая ниже статья А. А. Тяпкина содержит ряд дискуссионных положений. Редакция подробно обсуждала эту статью, и автор учел некоторые частные замечания членов редколлегии и рецензентов. Однако окончательный текст статьи, представленный автором, оставил повод для общих замечаний, которые редакция сочла целесообразным опубликовать вслед за статьей А. А. Тяпкина в этом же номере журнала.

530.12:531.18

**ВЫРАЖЕНИЕ ОБЩИХ СВОЙСТВ ФИЗИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ В ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ
МЕТРИКЕ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ**

А. А. Тяпкин

СОДЕРЖАНИЕ

I. Об условности понятия одновременности	618
1. К истории конвенционального решения вопроса об одновременности разноместных событий (618). 2. Причины отрицания условности опре- деления одновременности (623). 3. О доказательстве существования определенного произвола в выборе соглашения об одновременности (627).	632
II. Дальнейшее уточнение трактовки специальной теории относительности	
1. Формулировка принципа относительности (632). 2. Преобразования Лоренца (644).	
III. Заключение	650
Приложения	655
Цитированная литература	658

Специальная теория относительности внесла коренные изменения в самые фундаментальные и общие физические представления о движении материи, нашедшие выражение в установлении новых физических свойств пространства и времени. Знаменуя собой начало радикальной перестройки классической физики, специальная теория относительности оказала колоссальное влияние на формирование всех последующих разделов современной теоретической физики.

Так, с распространения требований специальной теории относительности на гравитационные взаимодействия началось преобразование теории тяготения Ньютона, которое завершилось затем созданием общей теории относительности. Волны де Бройля и, наконец, релятивистское уравнение Дирака в квантовой механике также явились результатом распространения идей этой теории.

Справедливость теории относительности *) была подтверждена как специально поставленными для ее проверки опытами, так и совпадением

*) В дальнейшем для сокращения мы часто будем опускать термин «специальная».

с опытом всей совокупности ее следствий. Законы теории относительности используются в современной технике при конструировании ускорителей частиц, различных сепараторов и спектрометров релятивистских частиц. служат основой энергетических расчетов, связанных с применением атомной техники.

Ни одно физическое учение, ни одно научное открытие не возбуждало такого широкого интереса общественности, как это имело место в случае теории относительности. Необычность выводов теории по самым, казалось бы, простым вопросам физики неизменно вызывала интерес к теории и далеко за пределами научных кругов. По физическим и философским проблемам теории относительности возникали горячие споры, и не только в первые годы ее существования.

Казалось бы, за несколько десятков лет со времени создания теории относительности ее построение и объяснение усилиями физиков могло бы быть доведено до совершенства, достаточного не только для прекращения всяческих споров, но и для успешного усвоения теории в программе школьного курса наряду с другими разделами классической физики. Однако, несмотря на обилие монографий и оригинальных учебных курсов по теории относительности*), изложение и объяснение этой простейшей из всех современных физических теорий сохраняет некоторые недостатки и пробелы ее первоначального построения и изложения, которые возникли в результате перехода к новым пространственно-временным преобразованиям без рассмотрения соответствующих им всеобщих кинематических свойств физических процессов в рамках галилеевских преобразований. Вместе с тем возможность такого рассмотрения, обеспечивающего развитие трактовки физического содержания теории, следует из некоторых не выясненных до конца и уже в значительной мере забытых утверждений создателей теории относительности. Так, в частности, с уяснением справедливости утверждения А. Пуанкаре об условности (конвенциональности) понятия одновременности событий, происходящих в различных точках пространства, становится очевидной необходимость анализа всего физического содержания специальной теории относительности с целью установления объективных положений, не зависящих от условных соглашений принятой формы представления теории.

1. ОБ УСЛОВНОСТИ ПОНЯТИЯ ОДНОВРЕМЕННОСТИ

1. К истории конвенционального решения вопроса об одновременности разноместных событий. Положенный в основу теории относительности постулат постоянства скорости света включает непосредственно проверяемое на опыте утверждение о независимости скорости света от движения источника света и предположение о равенстве в каждой инерциальной системе координат скоростей света в любых двух противоположных направлениях. Это последнее предположение, непосредственно используемое для установления в каждой системе отсчета одновременности разноместных событий, вовсе не может быть однозначно подтверждено экспериментом и принимается на основе условного соглашения, конвенции.

Еще в 1898 г. Пуанкаре в статье «Измерение времени»¹ поднял фундаментальный для будущей теории вопрос об отсутствии абсолютного времени и предопределенной одновременности двух событий. Он впервые обратил внимание на зависимость определения одновременности событий

*) В мировой литературе в настоящее время насчитывается более сотни книг по теории относительности.

от соглашения о величине скорости света в различных направлениях. Положение о независимости скорости света от движения источника, как известно, являлось непосредственным следствием широко распространенного представления о распространении света в особой светоносной среде — эфире. Приняв этот тезис, Пуанкаре вместе с тем пошел существенно дальше других, обнаружив в положении о том, что «свет имеет постоянную скорость и, в частности, что это есть скорость, одинаковая для всех направлений» (1, стр. 10), присутствие элемента условного соглашения, выходящего за рамки экспериментально устанавливаемых фактов. По поводу постоянства скорости света он сделал следующее категорическое утверждение: «Это есть постулат, без которого нельзя осуществить измерение этой скорости. Этот постулат никогда не может быть проверен прямо экспериментом. Он мог бы войти в противоречие с опытом, если результаты различных экспериментов не будут находиться в согласии. Мы должны считать себя счастливыми, что это противоречие не имеет места» (1, стр. 10). И хотя это утверждение было впоследствии повторено еще несколькими выдающимися учеными, оно, тем не менее, не получило общего признания, а содержание теории относительности не было проанализировано с учетом условного характера принятого определения одновременности.

Утверждение Пуанкаре о конвенциональном определении одновременности, так же как и его твердое убеждение в возможности точного описания результатов физического эксперимента на основе использования любой внутренней не противоречивой геометрии, были целиком отнесены к его философским взглядам*). Это обстоятельство уже само по себе вводило от необходимости конкретного решения в рамках физической науки вопроса о справедливости или ошибочности утверждений Пуанкаре. Кроме того, в современной литературе можно встретить также утверждение (см., например, работу³⁾ о внутренней противоречивости приведенного выше высказывания Пуанкаре, в котором отрицается возможность экспериментального подтверждения принятого постулата и в то же время признается возможность отвергнуть его на основе эксперимента.

На самом же деле возможность принять в каждой системе отсчета равенство скоростей света для противоположных направлений действительно зависит от свойств реального мира, в частности, от того факта, что в природе отсутствует мгновенная передача действий. Но принять это положение, в случае его допустимости, по мнению Пуанкаре, можно только в качестве соглашения, так как эксперимент в равной степени может быть согласован и с противоположным предположением о неравенстве этих величин.

Рассмотрим высказывания других авторитетных ученых об условном характере понятия одновременности.

Предположение о равенстве скоростей света в двух противоположных направлениях в движущейся системе А. Эйнштейн в работе 1905 г. вводит как определение (4, стр. 9). Однако, в отличие от Пуанкаре, он не касается вопроса о неоднозначной связи этого определения с опытными фактами. Поэтому выбор этого определения многими интерпретировался в качестве способа построения теории, а совпадение предсказаний теории с опытом признавалось за экспериментальное подтверждение исходного предположения.

В 1911 г. в докладе на заседании Общества естествоиспытателей в Цюрихе Эйнштейн уже более определенно высказывается в пользу конвенциональности принятого определения: «Именно, чтобы измерить

*) На самом же деле необходимо отличать утверждения Пуанкаре по поводу конкретных естественнонаучных соглашений от его высказываний в духе философского конвенционализма, отрицающего объективность научных теорий²⁾.

скорость света в определенном направлении, необходимо измерить расстояние между двумя точками A и B , между которыми распространяется сигнал, и затем — время отправления света из A и прибытия света в B . Следовательно, необходимо было бы проводить измерения времени в разных точках, что можно выполнить в том случае, если искомое определение времени уже существует. Но если скорость, в частности, скорость света, принципиально невозможно измерить без произвольных допущений, то мы имеем право делать произвольные предположения и о скорости света» (4, стр. 181).

В 1917 г. в популярной статье о теории относительности Эйнштейн повторяет утверждение о том, что равенство скоростей света делается на основе свободного выбора, но вкладывает эти слова лишь в уста дискутирующего с ним читателя (4, стр. 542). Во всех последующих многочисленных изложениях специальной теории относительности Эйнштейн совсем уже не касается этого вопроса. А отмеченные нами высказывания Эйнштейна остались незамеченными даже критиками конвенциональной точки зрения на понятие одновременности разноместных событий. Но и в те годы, когда Эйнштейн явно разделял точку зрения Пуанкаре по этому вопросу, он вовсе не проводил ее последовательно и не анализировал, в какой мере отдельные утверждения теории зависимы от принятого соглашения.

Для дальнейшего обсуждения нам важно отметить тот факт, что согласно Эйнштейну произвольность выбора определения одновременности вовсе не означала возможность выбора единой одновременности для двух движущихся относительно друг друга систем отсчета. В частности, он писал: «Итак, мы не имеем права а priori предположить, что можно выверить часы двух групп таким образом, что обе координаты времени элементарного события были бы одинаковы, иными словами, чтобы t было равно t' » (4, стр. 150). Таким образом, признав произвольность выбора определения одновременности, Эйнштейн не увидел в ней обоснования фактически использованного им в первой работе описания процесса распространения света в движущейся системе координат с помощью галилеевских пространственных масштабов и временных интервалов. Он также не усматривал и прямой связи конкретных формулировок релятивистских эффектов с принятым соглашением относительно одновременности разноместных событий. В 1911 г. в кратком замечании к статье В. Варичака он оспаривал мнение, что «лоренцево сокращение имеет свои корни исключительно в произвольном определении „способа сверки часов и измерения длин“» (4, стр. 187). Однако для доказательства ошибочности этого мнения Эйнштейн приводит пример мысленного эксперимента, в котором будто бы измеряется длина движущегося стержня без обращения к показаниям часов, установленных согласно условно принятому определению одновременности. В этом эксперименте он предлагает фиксировать в исходной системе координат места совпадения концов двух одинаковых стержней, движущихся в противоположные стороны с одинаковой по абсолютной величине скоростью. Недоразумение состоит в том, что Эйнштейн не замечает, что выдвинутое им при этом обязательное условие совпадения скоростей стержней, движущихся в противоположных направлениях, уже подразумевает использование определенного соглашения об одновременности. Ведь без принятия условного соглашения невозможно экспериментальное сопоставление для противоположных направлений не только скоростей распространения света, но и скоростей распространения любых физических процессов. Рассмотренным в мысленном эксперименте Эйнштейна движущимся навстречу друг другу стержням при другом соглашении относительно одновременности будут соответствовать разные по аб-

солютной величине скорости движения и разные длины в исходной системе координат. Поэтому расстояние между точками совпадения их концов вообще уже не будет являться длиной хотя бы одного из этих стержней в исходной системе координат. Ни фиксация положений совпадающих концов стержней, ни регистрация моментов их совпадений не позволяют на самом деле определить длину движущегося стержня или соответственно одновременные моменты времени, минуя соглашение о соотношении скоростей какого-либо физического процесса в прямом и обратном направлениях.

Отсутствие соответствующего примечания при публикации «Замечания к статье В. Варичака» в собрании научных трудов Эйнштейна уже само по себе говорит о том, что и в настоящее время нет достаточно ясного понимания этого вопроса. Показательно также, что и В. Паули в своей замечательной книге «Теория относительности» повторяет ту же ошибку, ссылаясь на мысленный эксперимент Эйнштейна с двумя стержнями как на доказательство того, что «необходимая для наблюдения лоренцова сокращения констатация одновременности происходящих в различных местах событий может быть осуществлена с помощью одних масштабов, без использования часов» (5, стр. 26—27).

Условность принятого определения одновременности также отмечали в своих работах А. Эддингтон, Л. И. Мандельштам, С. М. Рытов и С. Э. Хайкин. Следует особенно обратить внимание на тот факт, что Эддингтон при этом совершенно правильно подчеркивал тождественность двух форм соглашения об одновременности — с помощью переноса часов или синхронизации их световыми сигналами. Так, в 1923 г. он писал: «Таким образом, получается одна и та же разность в оценках одновременности наблюдателями S и S' , пользуемся ли мы методом переноса часов или световыми сигналами. В обоих случаях вводится условие относительно исчисления разности времен в различных местах. Это условие в двух приведенных методах принимает одну из следующих форм:

1) Часы, перемещаемые с бесконечно малой скоростью из одного места в другое, продолжают показывать правильное время в своем новом положении, или

2) Скорость света в одном направлении вдоль любой линии равна скорости его в обратном направлении.

Ни то, ни другое утверждение не является само по себе выражением экспериментального факта и не относится к какому-либо характерному свойству, присущему часам или свету; это просто формулировка правил, которыми мы предлагаем руководствоваться при распространении условных делений времени на весь мир. Но взаимное согласие обоих утверждений есть факт, который можно было бы проверить наблюдением» (6, стр. 39).

На конвенциональном характере понятия одновременности настаивал в своих лекциях Л. И. Мандельштам (7, стр. 190). Этот взгляд впоследствии отстаивали и его ученики С. М. Рытов и С. Э. Хайкин. Однако в лекциях Мандельштама не было отражено принципиальное отличие условного определения (типа соглашения относительно одновременности событий) от широко использованных в его лекциях определений физических величин через конкретные процедуры их измерения (7, стр. 180—190). Эти последние определения помогают конкретизировать физический смысл величин, но использование их для обоснования самих физических понятий ведет к необоснованному преувеличению значения операционалистской трактовки физической теории. Условное же соглашение само является необходимой предпосылкой возможности получения конкретных результатов в определенных измерениях. Например, без принятия определенного

соглашения о соотношении скоростей распространения какого-либо физического процесса в противоположных направлениях вообще невозможно провести измерение скорости распространения любого физического процесса и получить однозначную теоретическую схему описания кинематики физических процессов. Условными же эти принципиально необходимые соглашения являются в силу возможности принятия различных с количественной стороны вариантов соглашения. Л. И. Мандельштам обращает внимание на эту возможность принятия различных определений. Однако выяснение вопроса о том, что дает использование другого определения, он возлагает не на теоретический анализ, а на опыт: «Вы не можете сказать, что существует какое-то априорное понятие одновременности. Каким-то одним способом вы должны его определить. Но что покажет другой способ, это уже вопрос опыта» (7, стр. 190). На самом же деле специфика условных соглашений в том и состоит, что замена принятого соглашения ведет лишь к изменению теоретической формы описания тех же экспериментальных фактов, и потому соотношение между различными описаниями устанавливается из простого теоретического анализа без фактического обращения к сопоставлению опытов, использующих различные соглашения. Без раскрытия этой стороны вопроса акцентирование внимания на правильном утверждении об условности принятого соглашения, оказывается, ведет лишь к ложному обоснованию позитивистского взгляда на физическую теорию, создает предпосылку для выводов в духе философского конвенционализма, отрицающего объективность научных теорий.

На первый взгляд кажется, что Л. И. Мандельштам противоречит приведенному нами выше утверждению А. Эддингтона о согласии и тождественности двух форм соглашения об одновременности, приписывая теории относительности следующее утверждение: «Теория относительности это отвергает. Она утверждает, что если один раз вы перенесете часы, а другой раз будете определять синхронизацию при помощи сигнала, то получите две различные установки часов. Часы, синхронизированные при помощи переноса, окажутся не синхронизированными по радиосигналу» (7, стр. 190). Здесь, однако, возникает путаница только от того, что автор, в отличие от А. Эддингтона, не имеет в виду медленного переноса часов. Синхронизация часов по сигналу в случае соглашения о равенстве скоростей распространения сигнала в прямом и обратном направлениях как раз точно эквивалентна утверждению о том, что часы остаются синхронизированными при сколь угодно медленном переносе их в разные точки. Наоборот, приняв неравенство скоростей распространения сигнала, мы в рамках этого соглашения с неизбежностью должны призвать нарушение синхронизации часов при сколь угодно медленном их переносе. К такому выводу приводит простейший теоретический анализ этих двух процедур синхронизации при заданном соглашении о соотношении скоростей физических процессов в противоположных направлениях. От выбора измерительной процедуры как раз ничего не зависит. Выбору же условного соглашения о соотношении скоростей распространения физических процессов в прямом и обратном направлениях соответствует вполне определенная одновременность, которая может быть уже однозначно установлена любыми измерительными процедурами, учитывающими принятое соглашение.

В лекциях Л. И. Мандельштама затронут и важный вопрос о принципиальной возможности выбора единой одновременности в двух движущихся относительно друг друга системах отсчета. Однако этот вопрос изложен им весьма непоследовательно. С одной стороны, в лекциях мы встречаем утверждения, допускающие выбор единой одновременности и, соответственно, преобразований Галилея (см. 7, стр. 202—203 и 250). С другой

стороны, Л. И. Мандельштам утверждает, что «теория относительности... отрицает справедливость и уравнений Ньютона, и преобразований Галилея» (7, стр. 124), и характеризует далее точку зрения Эйнштейна словами: «Откуда вы знаете, что преобразования Галилея, т. е. выражаемые ими пространственно-временные соотношения, правильны?» (7, стр. 176).

Возможно, что эти выражения являются просто случайными оговорками или результатом неточной обработки лекций. Но остается все-таки фактом, что в утверждение о допустимости выбора единой одновременности и соответственно преобразований Галилея Л. И. Мандельштам не вкладывал смысл принципиальной возможности описания при этом релятивистских эффектов. Наоборот, он полагал, что опыт позволит выбрать из многих определений правильное. Такая расшифровка взглядов Л. И. Мандельштама подтверждается и данной им оценкой работы Г. А. Лоренца 1904 г. Шесть первых лекций его курса посвящены историческому обзору формирования идей теории относительности*). В конце этой части курса, обсуждая работу Лоренца, он отмечает как основной недостаток использование единого времени (7, стр. 164). Л. И. Мандельштам не замечает, что в работе Лоренца на основе старого соглашения об одновременности было дано описание новой физической теории.

С. М. Рытов, в обработке которого были изданы лекции Л. И. Мандельштама, повторил основные установки этого курса в написанной им главе «Оптика движущихся тел и специальная теория относительности» учебника физики под редакцией академика Н. Д. Папалекси¹⁰. К сожалению, он также сделал утверждение о необходимости обращения к эксперименту для выяснения согласия различных соглашений.

Во втором издании учебного курса «Механика»¹¹ С. Э. Хайкин также обращал внимание на условность принятого соглашения о равенстве скорости света в противоположных направлениях: «В постулат о постоянстве скорости света, как мы видим, входят высказывания, стоящие в различной связи с опытом — предположение об одинаковой скорости света при распространении «туда» и «обратно», которое не может быть проверено на опыте, и заимствованное из наблюдений утверждение о независимости скорости света от скорости источника...» (11, стр. 517). «Но мы не можем, например, проверить на опыте, что скорость света туда и обратно всегда одинакова — она по определению одна и та же» (11, стр. 512).

2. Причины отрицания условности определения одновременности. Итак, Пуанкаре, Эйнштейн, Эддингтон, Мандельштам, Рытов и Хайкин в разное время в период с 1898 г. по 1948 г. отстаивали мнение о невозможности экспериментального подтверждения предположения о равенстве скоростей света в прямом и обратном направлениях. Однако это утверждение, несмотря на авторитет отстаивающих его ученых, вовсе не стало общепризнанным**). И в этом на самом деле нет ничего удивительного. Фактически в своих высказываниях другие ученые не пошли дальше повторения утверждения

*) В этом подробном историческом обзоре, однако, остался совершенно не отраженным факт обсуждения основных исходных идей теории относительности в ранних работах Пуанкаре^{1,3,9}.

***) Отсутствие признания этого правильного физического утверждения доказывалось, во-первых, игнорированием этого важного положения во всех остальных многочисленных курсах и монографиях по теории относительности, во-вторых, постоянным появлением в научной печати ложных в своей основе предложений по осуществлению экспериментального сравнения скоростей распространения света в прямом и обратном направлениях и, наконец, тем фактом, что до сих пор остается не опровергнутой несостоятельная критика, отрицающая конвенциональный характер принятого определения одновременности⁵⁴.

Пуанкаре. Конкретное физическое утверждение о невозможности экспериментального установления равенства скоростей света для противоположных направлений так и не получило строгого и общего доказательства. Вполне ясны и некоторые мотивы отрицания справедливости этого утверждения по философским соображениям. Совершенно правильное положение об условности выбранного критерия одновременности в действительности оказалось использованным для утверждения позитивистского взгляда на науку, так как отсутствие анализа последствий других возможных соглашений об одновременности событий позволяло беспрепятственно выдавать общепринятую форму представления теории относительности за единственно возможную правильную теорию. Это и привело к тому, что некоторые ученые материалистических убеждений оказались в какой-то мере спровоцированы на выступления против правильного научного утверждения. Не только публикация в физической литературе 50-х годов подобных попыток решения конкретного физического вопроса об измерении скорости света на основе философских соображений⁵⁴, но и факт отсутствия в последующей научной литературе опровержения критики правильных высказываний о конвенциональности одновременности весьма красноречиво характеризуют современный уровень понимания центрального момента построения теории относительности.

Отрицательные оценки утверждения Пуанкаре об одновременности, к сожалению, можно встретить и в более поздней литературе. Так, например, в книге, посвященной историческим очеркам по теории относительности, У. И. Франкфурт характеризует взгляды Пуанкаре и Эддингтона об условности выбранного определения одновременности как философски несостоятельные: «Эддингтон вслед за Пуанкаре считает, что определение одновременности основано на соглашении о равенстве скорости света в противоположных направлениях. Конвенционалистский характер этого утверждения подчеркивается как Эддингтоном, так и Пуанкаре.

Однако многие авторы (А. Д. Александров, В. А. Фок и др.) справедливо рассматривают определение одновременности Эйнштейна как базирующееся на законе о постоянстве скорости света в противоположных направлениях. Конвенционалистская концепция Пуанкаре — Эддингтона не была воспринята большинством исследователей, а ее философская несостоятельность была показана во многих работах» (12а, стр. 90). Те же ошибочные утверждения были повторены автором и через семь лет в другой его книге^{12б}.

Действительно, в книге В. А. Фока имеется короткое замечание о том, что принятое в теории относительности определение одновременности «является не произвольным» (13, стр. 48). Более определенно с отрицанием конвенционального характера принятого определения одновременности выступал в ряде своих работ А. Д. Александров¹⁴. Приходится только сожалеть, что материалистические убеждения автора были обращены против факта существования научно-естественных конвенций, а вовсе не против философского конвенционализма.

Парадоксально и то, что развивая причинно-следственный подход, близкий к хронометрии, ранее успешно проанализированной в работе ирландского физика А. Робба¹⁵, А. Д. Александров, однако, в отличие от этого автора, не замечает, что события, прошедшие раньше заданного события в другой точке пространства, отделены от событий более поздних временным интервалом событий, которые принципиально не могут находиться в причинно-следственных отношениях с заданным событием.

Однако философы на самом деле не были едины в оценке тезиса об условном соглашении относительно одновременности событий. В работах известных американских философов Г. Рейхенбаха^{16, 17} и особенно

А. Грюнбаума^{18, 19} непосредственно подчеркивался факт произвольности выбора критерия одновременности, обусловленный существованием предельной скорости передачи взаимодействия. В несколько иной формулировке близкая точка зрения высказывалась и советским философом Ю. Б. Молчановым²⁰. Но, к сожалению, и эти авторы не пошли дальше простого признания этого тезиса. Не обнаружив возможности описания релятивистских явлений на основе использования единой одновременности галилеевских преобразований, они, естественно, и не пришли к уточнению формулировок важнейших положений теории.

Тот факт, что отдельными физиками и философами, уяснившими конвенциональную сущность определения одновременности, не было приведено строгое и общее доказательство этого положения, следует считать главной причиной широко распространенной недооценки этого важнейшего вопроса построения теории, которая наиболее ярко проявляется в периодическом появлении в научной печати новых предложений осуществления экспериментального сравнения скоростей света в противоположных направлениях. На рассмотрении подобных предложений нам придется задержаться внимание читателей, поскольку в них, казалось бы, должно содержаться прямое опровержение утверждения Пуанкаре о невозможности экспериментального доказательства равенства скоростей света в противоположных направлениях. Напомним, что С. И. Вавилов в свое время внес большой вклад в критический анализ ранее предложенных экспериментов по доказательству равенства скоростей света в противоположных направлениях или обнаружению в них различия первого порядка относительно v/c . В 1928 г. в книге «Экспериментальные основания теории относительности», подводя итоги подробного рассмотрения таких предложений, он писал: «Изложенные проекты сами по себе верны и неосуществимы по условиям физических измерений. Значительно большее число выполненных или проектированных опытов первого порядка ошибочны по своей идее. Можно бы написать длинную историю таких ошибок или нецелесообразности опытов. Они давали неизменный отрицательный результат, который, однако, тривиален, потому что вытекает сразу из обеих конкурирующих гипотез — увлекаемого и неувлекаемого эфира; из таких опытов нельзя сделать никакого теоретического вывода»^(21, стр. 24—25). Однако, несмотря на этот суровый приговор рассмотренным предложениям так называемых опытов первого порядка, С. И. Вавилов не привел общего доказательства несостоятельности всех подобных опытов, пытающихся подвергнуть экспериментальной проверке не физическое утверждение, а условное соглашение о равенстве скоростей света в противоположных направлениях^{*}). По этой причине проведенный им критический анализ прежних проектов опытов первого порядка не помешал повторению аналогичных ошибок в наше время.

В журнале «Успехи физических наук» в статье Н. Г. Басова и др.^(24, стр. 49—53) и в статье Г. М. Страховского и А. В. Успенского²⁵ были описаны предложенные и проведенные за рубежом опыты первого порядка, а также проект опыта, предложенного Г. М. Страховским. Эти предложения были опубликованы без тени сомнения авторов статей и без каких-либо редакционных примечаний, обращающих внимание на необоснованность подобных опытов. За прошедшие годы не появилось опровержения этих предложений и со стороны многочисленных читателей журнала. А вновь

^{*}) Такие «опыты» не следует, конечно, путать с экспериментами первого порядка по проверке независимости скорости света от скорости движения его источника^{22, 23} или по проверке релятивистского эффекта сложения скоростей при измерениях скорости какого-либо физического процесса в случае различных скоростей движения его источника.

предложенные опыты первого порядка имеют столь же ложное обоснование, как и ранее рассмотренные С. И. Вавиловым, и отличаются от них лишь использованием новейших технических средств. Ложность интерпретации подобных опытов как экспериментального доказательства равенства скоростей света в противоположных направлениях мы покажем на примере предложения Г. М. Страховского²⁶. В этом опыте предлагается измерять разность фаз колебаний двух несинхронизированных молекулярных генераторов, находящихся на некотором расстоянии друг от друга. Наблюдаемая разность фаз зависит от скорости распространения этих колебаний в одном определенном направлении. Далее предлагается наблюдать изменения измеряемой разности фаз колебаний при взаимной замене положений генераторов. Утверждается, что в случае отличия скоростей распространения колебаний в прямом и обратном направлениях на величину $2v$ должно произойти изменение измеряемой разности фаз, пропорциональное первой степени v . Этот вывод, заключающий обоснование постановки данного эксперимента, является, однако, совершенно ошибочным. На самом деле наблюдаемая разность фаз колебаний должна оставаться неизменной независимо от того, считаете ли вы скорости распространения колебаний одинаковыми или принимаете значения $c - v$ и $c + v$ для противоположных направлений. В случае принятия последнего соглашения необходимо будет учесть рассинхронизацию генераторов (часов), обязательно возникающую при сколь угодно медленном их переносе на новые места. Эта рассинхронизация генераторов в точности компенсирует разность фаз колебаний, накапливаемую на расстоянии L из-за приписываемого нами различия скоростей распространения колебаний.

Типичным для всех таких опытов первого порядка является построение их обоснования на ошибочном расчете эффекта в случае предположения о неравенстве скоростей света для противоположных направлений. Курьезность положения с уже проведенными опытами такого рода состоит в том, что, отбросив ложный вывод об экспериментальном доказательстве равенства скоростей света в противоположных направлениях, трудно вложить в них какой-либо физический смысл, допускающий другую интерпретацию полученных результатов. В отличие от экспериментов первого порядка, указанных в примечании на стр. 625, эти опыты не имеют отношения к проверке физических утверждений теории относительности^{*)}.

Таким образом, пробел в понимании центрального момента традиционного построения теории относительности ныне приводит к самым реальным потерям, связанным с расходом средств и усилий на выполнение экспериментов, исходящих из ложных посылок.

Конечно, для ликвидации этого пробела в понимании теории вовсе не достаточно одного лишь признания факта конвенциональности понятия одновременности. Кроме строгого доказательства невозможности измерения скорости распространения любого физического процесса в определенном направлении без специального соглашения о соотношении со скоростью процесса в противоположном направлении, необходимо выяснить зависимость отдельных положений теории от принятого соглашения и затем установить объективное содержание теории, остающееся инвариантным при изменении выбранного соглашения.

*) Можно было бы говорить о поиске иной интерпретации таких опытов в случае получения положительного результата, означающего нарушение как законов специальной теории относительности, так и законов классической механики. Однако такое новое обоснование необходимости постановки подобных опытов первого порядка должно обязательно включать доказательство того, что предполагаемый положительный результат по обнаружению нарушения законов не противоречит уже проведенным многочисленным экспериментам.

3. О доказательстве существования определенного произвола в выборе соглашения об одновременности. В настоящем разделе мы покажем, что из факта существования конечной величины предельной скорости передачи взаимодействия между физическими объектами непосредственно следует невозможность установления для разноместных событий однозначной одновременности на основе причинно-следственных отношений, определяемых материальными процессами. Не только не существует абсолютной одновременности событий для различных движущихся относительно друг друга инерциальных систем отсчета, но и для каждой из этих систем координат не существует однозначной одновременности, определяемой самими материальными процессами. Поэтому для доказательства высказанного утверждения достаточно будет ограничиться рассмотрением причинно-следственных отношений для событий в одной системе отсчета.

Пусть из начала координат ($x = 0$) выбранной системы отсчета в некоторый момент $t_1(0)$ осуществлена передача вдоль оси x реального взаимодействия с предельно возможной скоростью (событие $E_1(0)$)*. Пусть далее в момент $t_2(x)$ прибытия действия в точку x осуществляется передача действия также с максимально возможной скоростью, но уже в обратном направлении (событие $E_2(x)$). В момент $t_3(0)$ регистрируется факт возвращения действия в точку $x = 0$ (событие $E_3(0)$).

Очевидно, что все события в точке $x = 0$, предшествующие событию $E_1(0)$, произошли абсолютно раньше события $E_2(x)$, а события, следующие за событием $E_3(0)$, произошли абсолютно позже события $E_2(x)$. Измеряемый интервал времени $t_3(0) - t_1(0)$ позволяет определить лишь некоторую эффективную величину предельной скорости передачи взаимодействия «туда» и «обратно» $c = 2x/(t_3 - t_1)$. Приведенное рассмотрение не позволяет определить величину предельной скорости отдельно для каждого из этих направлений.

Конечная величина предельной скорости передачи взаимодействия приводит к отличному от нуля измеряемому интервалу времени $t_3(0) - t_1(0)$. Специфическая особенность множества событий в точке $x = 0$ с временной координатой t , заключенной внутри интервала $t_3(0) - t_1(0)$, состоит в том, что эти события не могут находиться в причинно-следственных отношениях с событием E_2 в точке**). На этом основании А. Робб¹⁵ предлагал все множество событий внутри интервала $t_3(0) - t_1(0)$ не рассматривать находящимся в каких-либо временных отношениях с событием $E_2(x)$. Противоположную точку зрения выдвинул Ю. Б. Молчанов²⁰, предложив все множество моментов времени внутри этого интервала считать объективно одновременными с событием $E_2(x)$ на том основании, что в точке $x = 0$ только моменты времени, не входящие в это множество, могут считаться объективно происшедшими раньше или позже события E_2 в точке x .

*) Отметим, что рассмотрение процесса передачи взаимодействия между материальными объектами, размещенными в различных точках пространства, непосредственно отвечает изучению цепочек причинно-связанных событий. Именно эту сторону материального процесса имеют в действительности в виду при рассмотрении в теории относительности процесса посылки сигнала, а вовсе не процесс передачи и приема субъектом информации в виде сигнала. Следует также отметить, что при использовании образа пространственно-временных событий подразумевается отвлечение от всего разнообразия свойств реальных событий физического мира и учитывается только объективная возможность нахождения этих событий в причинно-следственных отношениях.

**) Эти события находятся вне световых конусов, построенных из точки x в положительном и отрицательном направлениях оси времени.

Однако обе эти крайние точки зрения просто неприемлемы, хотя бы по соображениям практического требования однозначности конкретного описания физических процессов. Любое возможное кинематическое описание исходит из сопоставления только одного момента времени в какой-либо пространственной точке как одновременного с некоторым моментом времени в другой точке. Поэтому более правильно будет, следуя Дж. Уиттроу⁽²⁷⁾, стр. 383) назвать все эти моменты времени, заключенные внутри интервала $t_3(0) - t_1(0)$, потенциально одновременными с событием $E_2(x)$. При этом, конечно, следует под термином «потенциальный» подразумевать лишь возможность реализации любой из этих одновременностей в выбранной конкретной схеме кинематического описания физических процессов.

Момент времени события $E_2(x)$ в общем виде может быть выражен через временные координаты событий E_1 и E_3 в точке $x = 0$ следующим простым отношением:

$$t_2(x) = t_1(0) + \varepsilon [t_3(0) - t_1(0)],$$

где параметр ε заключен в пределах $0 < \varepsilon < 1$. Выбор конкретного значения параметра ε в указанном интервале и означает признание момента времени $t_2(0) = t_1(0) + \varepsilon [t_3(0) - t_1(0)]$ в начале координат одновременным с событием E_2 в точке x . Значение $\varepsilon = 1/2$ соответствует предположению о равенстве предельных скоростей передачи взаимодействия для противоположных направлений в рассматриваемой системе отсчета. В этом, естественно, состоит удобство выбранной Пуанкаре и Эйнштейном одновременности в каждой системе координат. Но нам необходимо выяснить, существуют ли физические причины, исключающие возможность построения кинематического описания физических процессов на основе выбора одновременности, отвечающей значениям $\varepsilon \neq 1/2$.

Приведенное выше рассмотрение процесса передачи взаимодействия с предельно возможной скоростью действительно не позволяет выделить какое-либо конкретное значение ε как соответствующее объективной одновременности событий в разных точках данной системы. Это рассмотрение показывает, что любому событию в одной точке системы может быть сопоставлена совокупность событий в различные моменты времени в другой точке, которые не могут находиться с первым в причинно-следственных отношениях. Однако это лишь необходимое, но не достаточное условие для обоснования возможности выбора одновременности, не соответствующей значению $\varepsilon = 1/2$ *). Действительно, выбор значения $\varepsilon \neq 1/2$ соответствует предположению о различии скоростей в прямом и обратном направлениях не только для процесса распространения света, но и для всех остальных физических процессов.

Так, для света это различие в скоростях распространения «туда» и «обратно» равно $2c(1 - 2\varepsilon)$. Для произвольного физического процесса различие в скоростях распространения в противоположных направлениях при $\varepsilon = 1/2$ будет равно

$$2c(1 - 2\varepsilon) \{[(c^2/u^2) - 1] [4\varepsilon(1 - \varepsilon)]^{-1} + 1\}^{-1},$$

*) Следует отметить что Г. Рейхенбах¹⁷ в полном соответствии с традиционной трактовкой теории относительности считал лишь значения $\varepsilon = 1/2$ отвечающим одновременности в данной системе координат. События, соответствующие остальным значениям ε , признавались им одновременными с заданным причинно не связанным с ним событием только в соответствующих определенных системах отсчета, движущихся относительно исходной системы координат. А. Грюнбаум в последних своих работах^{18,19} для выбора в одной и той же системе отсчета различных соглашений об одновременности, напротив, считал достаточным установления принципиальной невозможности причинной связи между событием в одной точке с целой совокупностью событий в другой точке пространства.

где u — скорость рассматриваемого физического процесса при изотропном описании.

Хотя физические процессы, распространяющиеся в пространстве со скоростью, меньшей предельной, не определяют границы множества причинно несвязанных событий, тем не менее только на сопоставлении с ними мог бы основываться любой мыслимый эксперимент по обнаружению анизотропии в скорости процесса, распространяющегося с предельной скоростью. Экспериментальное обнаружение различия скоростей распространения процессов в прямом и обратном направлениях, безусловно, стало бы возможно, если бы имело место любое изменение кинематических соотношений для различных физических процессов по сравнению с теми, когда скорости всех процессов не зависят от направления.

Поэтому для окончательного доказательства возможности произвольного выбора одновременности в пределах временного интервала для причинно-несвязанных событий необходимо в общем случае показать, что любые наблюдаемые на опыте кинематические соотношения между самыми различными физическими процессами не зависят от выбранного для их описания значения параметра одновременности ϵ . Как было показано в нашей работе²⁸, необходимо независимость всех экспериментально наблюдаемых соотношений от выбора степени всеобщей анизотропии в кинематическом описании физических процессов полностью гарантирует одновременное выполнение двух следующих условий:

1) Произвольно допустимая анизотропия в кинематическом описании процессов должна характеризоваться неизменной для всех физических процессов разностью времен распространения между двумя определенными точками пространства в прямом и обратной направлениях. (Выполнение этого условия приводит к невозможности обнаружения анизотропии в прямом сопоставлении скоростей различных процессов для противоположных направлений.)

2) Неизменным также должно оставаться отношение суммарных времен распространения в прямом и обратном направлениях для любых физических процессов. (Соблюдение этого условия исключает и последнюю возможность экспериментального обнаружения введенной асимметрии описания при сопоставлении для любых физических процессов суммарных времен распространения «туда» и «обратно».)

Совершенно очевидно, что выбор значения $\epsilon \neq 1/2$ в указанных пределах от 0 до 1 не нарушает этих условий для процессов, распространяющихся непосредственно вдоль оси x . Но действие из одной точки в другую можно передать и по любому другому пути, соединяющему те же две точки на оси x . Более детальное рассмотрение показывает, что выдвинутые условия принципиальной ненаблюдаемости асимметрии кинематического описания процессов выполняются при определенном соответствии выбора одновременности во всех точках пространства. Так, например, если для направления оси x выбран параметр $\epsilon_0 \neq 1/2$ и его отклонение от $1/2$ для этого направления принято максимальным, то для всех остальных направлений в пространстве параметр асимметрии должен быть равен

$$\epsilon(\theta) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} (1 - 2\epsilon_0) \cos \theta [1 - (1 - 2\epsilon_0)^2 \sin^2 \theta]^{-1/2}.$$

Если при изотропном описании $\epsilon = 1/2$ для всех направлений одновременные моменты времени изображаются плоскостью, параллельной плоскости X, Y , то одновременные значения для экспериментально неотличимого анизотропного описания должны в этом пространстве изображаться плоскостью, наклонной к плоскости X, Y . При этом в описании скоростей распространения каждого физического процесса появляется

определенная зависимость от направления

$$u^*(\theta)^* = uf(\theta^*, u),$$

где u — скорость рассматриваемого физического процесса при выборе изотропного варианта описания.

В приложении А показано, что из требования выполнения условий 1 и 2 однозначно определяется зависимость функции $f(\theta^*, u)$ от величины u :

$$f(\theta^*, u) = [\alpha(\theta)^* + u\beta(\theta)^*]^{-1}, \quad (4)$$

где функции $\alpha(\theta)^*$ и $\beta(\theta)^*$ являются уже обязательно общими для всех физических процессов.

Конкретный вид этих функций будет определен в следующей главе при рассмотрении описания процессов в двух движущихся относительно друг друга системах отсчета *).

В настоящем же разделе нам важно было выяснить, что допустимая в пределах временного интервала, соответствующего причинно несвязанным событиям, произвольность в выборе критерия одновременности приводит к соответствующей всеобщей анизотропии в описании скоростей всех процессов, удовлетворяющей условиям сохранения неизменными любых кинематических соотношений между различными процессами. Предположение о различии скоростей распространения света в прямом и обратном направлениях на величину меньше $2c$ отвечает выбору критерия одновременности событий, допустимому причинно-следственными отношениями. Соответствующие изменения в описании скоростей других физических процессов полностью исключают какие-либо экспериментальные эффекты, отличающие принятое описание от изотропного **). Несмотря на допущение явной зависимости скорости распространения отдельного физического процесса от направления, своеобразное кинематическое подобие, обеспечивающее независимость кинематических отношений между различными физическими процессами, делает такое описание совершенно тождественным изотропному в отношении любых наблюдений. Опыт, допускающий объяснение на основе изотропного описания, всегда может быть интерпретирован и в рамках кинематически подобного ему анизотропного описания скоростей физических процессов. Нельзя сказать, что обсуждаемая нами возможность анизотропного описания всей совокупности физических процессов должна быть отвергнута из соображений ненаблюдаемости анизотропии. Ведь в той же мере ненаблюдаема и изотропия обычно используемого описания. Точнее будет сказать, что эксперимент не позволяет принципиально отличить изотропное описание от описания, допускающего определенного вида всеобщую анизотропию в скоростях физических процессов. Конечно, имеется целый ряд веских оснований для предпочтительного выбора изотропного варианта описания. Но нам важно здесь подчеркнуть, что выбор этот делается не на основании однозначной расшифровки экспериментальных данных, а на основании определенной конвенции, соглашения. Имеющийся произвол относится только к выбору

) Заметим, что установление функции угловой зависимости в описании скоростей отдельного физического процесса, например, распространения света, позволяет найти функции $\alpha(\theta^)$ и $\beta(\theta^*)$ и определить согласно соотношению (1) угловую зависимость в описании уже любого физического процесса.

***) Поэтому нет и не может быть экспериментов, доказывающих равенство скоростей распространения света в двух противоположных направлениях. Анализ предложений подобных экспериментов имеет смысл проводить только с целью определения конкретных ошибок в расчетах, проведенных для обоснования этих предложений.

формы кинематического описания физических явлений, по отношению к которому экспериментальные факты выступают своеобразными «объективными инвариантами»^{*}). Поэтому допустимость различных соглашений в данном случае характеризует лишь широкие возможности выбора форм описания одних и тех же экспериментальных фактов и не может служить основанием для позитивистских выводов.

Выбор определенного соглашения об одновременности событий в различных точках пространства приводит не только к появлению соответствующей всеобщей анизотропии в описании кинематики физических процессов, но и к соответствующему изменению пространственных и временных масштабов. Например, два по-разному ориентированных в пространстве отрезка, соответствующие одинаковому суммарному времени распространения какого-либо физического процесса в прямом и обратном направлениях, принимаются равными по длине только в случае изотропного варианта описания. Те же самые отрезки выражаются разными длинами в соответствии с принятой функцией анизотропии скоростей физических процессов. Иначе говоря, проблема конгруэнтности (условия тождественности) по-разному ориентированных в пространстве отрезков также допускающая решение на основе произвольного выбора, в данном случае должна решаться в соответствии с уже сделанным выбором критерия одновременности. Можно показать, что отношение между пространственными масштабами анизотропного и изотропного описания пропорционально функции $\alpha^{-1}(\theta^*)$:

$$l^*(\theta^*)/l' = \gamma\alpha^{-1}(\theta^*),$$

где величина γ не зависит от угла θ^* . В частности, при этом преобразовании окружность переходит в эллипс, а сумма углов треугольника остается инвариантной.

Имеющаяся взаимосвязь анизотропии кинематического описания и величин пространственных масштабов с выбором определенного соглашения об одновременности событий в различных точках пространства легко установить из теоретического рассмотрения, не обращаясь к анализу каких-либо экспериментов. Практически же для реализации одновременности, отвечающей анизотропному описанию, нужно при синхронизации часов исходить из предположения о соответствующей зависимости скоростей процесса от направления распространения. При этом не только распространение света, но и любой из физических процессов может быть взят для определения времени в каждой точке пространства (по событиям, отвечающим моменту отправления сигнала и моменту его возвращения) и установления одновременности в различных точках системы отсчета

Следует заметить, что выяснение всех этих вопросов требует рассмотрения физических процессов только в одной системе координат, и, следовательно, существование определенной произвольности выбора описания могло быть установлено задолго до появления теории относительности из анализа предположения об отсутствии в природе мгновенной передачи взаимодействия между пространственно разделенными объектами.

И действительно, этот вопрос был поставлен и решен еще до создания теории относительности в 1898 г. в работе Пуанкаре «Измерение времени». В этой работе содержится правильный вывод о том, что в связи с

^{*}) Понятие «объективные инварианты» было введено Пуанкаре для обозначения утверждений физической теории, не зависящих от выбранной схемы описания. Как было отмечено в «Философской энциклопедии»²⁹, в этом проявилась явно материалистическая тенденция развития взглядов Пуанкаре.

невозможностью экспериментального подтверждения одинаковости скорости света для разных направлений проблема определения одновременности событий должна решаться на основе выбора удобного соглашения: «Одновременность двух событий или порядок их последовательности, равенство двух длительностей должны определяться таким образом, чтобы формулировка естественных законов была такой простой, насколько это возможно. Другими словами, все эти правила, все эти определения являются лишь плодом неосознанного соглашения» (1, стр. 13).

В настоящем разделе мы привели лишь более развернутое обоснование этого тезиса и подробно рассмотрели последствия выбора соглашения, которое приводит к неудобному описанию явлений в одной системе координат. Но, как будет ясно из дальнейшего, этот случай оказывается полезным для проведения важного сопоставления описаний физических процессов в движущихся относительно друг друга системах отсчета в единых пространственно-временных масштабах.

II. ДАЛЬНЕЙШЕЕ УТОЧНЕНИЕ ТРАКТОВКИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

1. **Ф о р м у л и р о в к а п р и н ц и п а о т н о с и т е л ь н о с т и.** В литературе можно встретить несколько формулировок принципа относительности. В одних формулировках обращается внимание на тот факт, что никакими физическими опытами, проведенными в одной инерциальной системе отсчета, невозможно обнаружить движение относительно другой инерциальной системы отсчета. В других формулировках принципа относительности подчеркивается факт равноправия различных инерциальных систем координат, возможность выбора одинакового описания физических явлений *).

Однако эти точные формулировки принципа относительности не настолько конкретны, чтобы из них было ясно, имеем ли мы дело с полным совпадением или лишь с подобием по-разному протекающих физических явлений. Для выяснения принципиального различия этих двух возможностей осуществления в природе принципа относительности рассмотрим две движущиеся относительно друг друга инерциальные системы координат.

Выберем в одной из этих систем координат одновременность, соответствующую удобному изотропному описанию физических процессов, и назовем эту систему координат K исходной. В движущейся относительно нее системе координат используем одновременность, совпадающую с одновременностью исходной системы K . Обозначим такую систему отсчета буквой K^* . Координаты систем отсчета K и K^* будут связаны, естественно, преобразованиями Галилея.

Если бы в природе для всех физических явлений действовал классический принцип относительности Галилея, то оказались бы справедливыми гипотеза Герца о полном увлечении эфира движущимися телами и баллистическая гипотеза Ритца для оптических явлений. В этом случае мы обнаружили бы, что все физические процессы получают также изотропное описание и в системе K^* в пространственно-временных масштабах, выбранных совпадающими с масштабами исходной системы K . Кроме того, для соответствующих физических процессов имело бы место полное совпа-

*) Встречаются и менее определенные варианты этих двух типов формулировок принципа относительности. Так, утверждается, например, что в движущихся относительно друг друга инерциальных системах отсчета все физические явления происходят одинаковым образом. Из дальнейшего будет видно, что этот вариант формулировки, строго говоря, не соответствует действительному содержанию принципа относительности, установленного релятивистской теорией.

дение кинематических описаний в обеих системах *). Естественно было бы отождествлять одинаковость физических законов в этих системах, выражающих связи между различными характеристиками физических процессов, с инвариантностью относительно преобразований Галилея. В этом случае мы имели бы все основания не возвращаться к обсуждавшейся в предыдущем разделе абстрактной возможности выбора практически неудобных неизотропных вариантов описания кинематики физических процессов.

Однако распространение принципа относительности Галилея не только на механические, но и на все другие физические явления означало бы, например, существование прямой зависимости скорости света от движения его источника. А для α -частиц, испущенных покоящимися в системе K^* ядрами, скорость относительно исходной системы отсчета выражалась бы непосредственно суммой векторов скорости системы K^* и скорости α -частицы относительно системы K^* . Но опыты первого порядка, в которых исследуется независимость скорости света от движения источника или проверяется релятивистская формула сложения скоростей, непосредственно отрицают именно такую возможность осуществления в природе обобщенного принципа относительности Галилея. В то же время любая из перечисленных выше формулировок принципа относительности совместима с таким обобщенным принципом относительности Галилея.

Известные затруднения классической физики в решении проблемы объединения принципа относительности с постулатом о независимости скорости света от движения источника как раз и возникли из-за неприемлемости простого обобщения принципа относительности Галилея на электромагнитные и оптические явления. Решение этой проблемы состояло в установлении совсем другой формы осуществления в природе принципа относительности, лежащей в основе новых физических представлений о времени и пространстве. Для наглядного непосредственного выявления принципиального отличия осуществляющегося в природе принципа относительности от рассмотренного выше обобщенного принципа относительности Галилея необходимо воспользоваться теми же системами координат K и K^* , в которых используется единая одновременность и одинаковые пространственные и временные масштабы. С этой целью нам следует выяснить возможность осуществления в движущейся системе координат K^* принципа относительности, согласующегося с фактом независимости скорости света от движения его источника.

В физической литературе широко распространено мнение о невозможности объединения двух исходных принципов теории относительности без отказа от использования преобразований Галилея **). В частности, затруднения классической физики в решении этой проблемы обычно объясняют использованием единой одновременности в двух системах отсчета, находящихся в состоянии поступательного движения относительно друг друга. Из дальнейшего будет понятно, что это мнение вовсе не соответствует действительности и его широкое распространение в литературе стало возможным только из-за некоторой ограниченности общепринятой трактовки теории относительности. В природе при больших скоростях

) При этом имеется в виду сопоставление одних и тех же физических процессов в одинаковых условиях в соответствующих системах отсчета. Например, если в системе K рассматривается процесс испускания α -частиц ядрами, покоящимися в этой системе, то в системе K^ необходимо рассматривать аналогичный процесс испускания α -частиц такими же ядрами, но уже покоящимися в системе K^* . Это касается и процесса распространения света, источники которого также должны выбираться покоящимися в соответствующих системах отсчета. Термины «соответствующие величины» и «соответствующие состояния» были применены Лоренцом³⁰.

***) См., например, лекции Л. И. Мандельштама (7, стр. 164).

движения действительно не осуществляется принцип относительности Галилея, и физические явления, включая и механические, не инвариантны относительно пространственно-временных преобразований Галилея. Но отсюда вовсе не следует невозможность использования этих преобразований и лежащей в их основе единой одновременности для описания физических явлений в двух движущихся относительно друг друга инерциальных системах координат. Наоборот, только на основе использования одинаковых пространственно-временных масштабов в различных системах отсчета возможно установить имеющееся в ходе физических процессов в этих системах различие, не нарушающее принципа относительности. Утверждение же о том, что свойства природы исключают возможность выбора группы Галилея для описания физических явлений, с принципиальной точки зрения оказывается эквивалентным нелепому утверждению, что свойства природы исключают возможность измерения длин в дюймах и допускают измерение в сантиметрах *). Отметим также, что не существует и практических затруднений в установлении на пространственных и временных шкалах системы отсчета K^* масштабных единиц, совпадающих с единицами исходной системы K .

Итак, в соответствии с выбранным определением одновременности все физические процессы в исходной системе K получают удобное изотропное описание. В частности, и для процесса распространения света получаем в системе K скорость, не зависящую от направления. Для того, чтобы установить на основе той же одновременности описание скоростей различных процессов в движущейся системе координат K^* , необходимо первоначально рассмотреть в системе K^* процесс распространения света, так как нужная для этого информация следует из факта независимости скорости света от движения его источника. Действительно, в исходной системе K с не зависящей от направления постоянной скоростью c будет распространяться и свет, испущенный покоящимся в системе K^* источником. В то же время в системе отсчета K^* , движущейся со скоростью v относительно исходной системы K , скорость распространения света должна обязательно описываться следующей функцией угла θ^* :

$$u_c^*(\theta^*) = (c^2 - v^2 \sin^2 \theta^*)^{1/2} - v \cos \theta^*, \quad (2)$$

где θ^* — угол, измеренный в системе K^* между направлением распространения света и осью x^* , выбранной в направлении, противоположном направлению относительного движения системы K .

В частности, скорость света равна $c - v$ вдоль оси x^* , и $c + v$ — в противоположном направлении. Казалось бы, эта неинвариантность процесса распространения света относительно преобразований Галилея должна проявиться непосредственно в экспериментах как нарушение принципа относительности. Однако этот вывод будет ошибочным, если неинвариантность носит всеобщий характер, так что в описании скоростей всех других процессов, воспроизведенных в системе отсчета K^* , возникает аналогичная соотношению (2) анизотропия, удовлетворяющая требованию подобия кинематических характеристик. А это и будет означать, что в природе осуществляется новый вариант принципа относительности, который невозможно, конечно, отличить от классического принципа относительности

*) Критикуя утверждение о возможности выбора для описания опытных данных только определенную геометрию, Пуанкаре писал относительно постановки этого вопроса: «С моей точки зрения, он вполне равносителен следующему вопросу, нелепость которого всякому бросается в глаза: существуют длины, которые можно выразить в метрах и сантиметрах, но которые нельзя измерить тузами, футами и дюймами» (96, стр. 86).

Галилея никакими опытами в движущейся системе K^* и только при рассмотрении относительно другой инерциальной системы явлений, воспроизведенных в системе отсчета K^* , выявляется нарушение классического принципа относительности.

Итак, принцип относительности может быть совместим с фактом независимости скорости света от движения источника только в том случае, если и все другие физические процессы происходят таким образом, что в описании их скоростей в системе K^* обнаруживается зависимость от направления, удовлетворяющая условиям неотличимости от изотропного варианта описания. Воспользовавшись соотношениями, полученными в приложении А, мы можем на основании функции (2), описывающей зависимость скорости света от угла θ^* в системе K^* , определить для скорости произвольного физического процесса угловую зависимость, отвечающую условию подобия. Для этого в соотношения (А,1) и (А,2) из приложения подставим известную нам для света функцию $f_c(\theta^*)$, которая согласно (2) равна

$$f_c(\theta^*) = u_c(\theta^*)/c = [1 - (v^2/c^2) \sin^2 \theta^*]^{1/2} - (v/c) \cos \theta^*.$$

В результате получим

$$\begin{aligned} \alpha(\theta^*) &= [1 - (v^2/c^2) \sin^2 \theta^*]^{1/2} / [1 - (v^2/c^2)], \\ \beta(\theta^*) &= (v/c^2) \cos \theta^* / [1 - (v^2/c^2)]. \end{aligned}$$

Следовательно, функция угловой асимметрии для скорости произвольного физического процесса в системе K^* согласно соотношению (1) будет иметь вид

$$f_u(\theta^*) = [1 - (v^2/c^2)] / \{ [1 - (v^2/c^2) \sin^2 \theta^*]^{1/2} + (uv/c^2) \cos \theta^* \},$$

а величина абсолютной скорости $u^*(\theta^*)$ произвольного физического процесса для направления под углом θ^* к оси x^* в системе K^* будет выражаться через величину скорости u соответствующего физического процесса в исходной системе K следующим соотношением:

$$u^*(\theta^*) = u [1 - (v^2/c^2)] / \{ [1 - (v^2/c^2) \sin^2 \theta^*]^{1/2} + (uv/c^2) \cos \theta^* \}, \quad (3)$$

где величины $v < c$ и $u < c$.

В частности, для величин скоростей распространения произвольного процесса в направлении оси x и в противоположном направлении получим соответственно

$$\begin{aligned} u^*(0) &= u [1 - (v^2/c^2)] / [1 + (uv/c^2)], \\ u^*(\pi) &= u [1 - (v^2/c^2)] / [1 - (uv/c^2)]. \end{aligned} \quad (4)$$

Из этих соотношений в согласии с (2) для света ($u = c$) получаем скорости равными $c - v$ и $c + v$.

Необходимо особо обратить внимание на то, что, в отличие от рассмотренных нами в предыдущей главе условий кинематического подобия, относящихся к различным возможным описаниям одних и тех же физических процессов в одной и той же системе координат, здесь речь идет о кинематическом подобии изотропного описания физических процессов в исходной системе отсчета K и анизотропного описания соответствующих физических процессов, воспроизведенных в тех же условиях в движущейся системе K^* . Принципиальное отличие состоит в том, что доказательство возможности преобразования изотропного описания в анизотропное в той же системе координат не требовало никаких экспериментальных фактов или теоретических предположений, кроме отрицания возможности

мгновенной передачи взаимодействия, а переход от одного описания к другому осуществлялся лишь принятием соответствующего соглашения. Доказательство же возможности получения аналогичных кинематически подобных соотношений для соответствующих физических процессов, воспроизведенных в другой инерциальной системе отсчета, основывается на новых фактах, касающихся выполнения принципа относительности для всех физических явлений и существования в природе процесса, скорость распространения которого не зависит от движения источника. Эти исходные постулаты теории относительности непосредственно включают общие сведения о свойствах реального мира, которые и были нами использованы для установления того факта, что физические процессы в движущихся относительно друг друга инерциальных системах координат протекают различным образом, но с сохранением кинематического подобия в соотношениях между характеристиками различных физических процессов. Условным является лишь конкретное выражение этого факта: изотропное описание скоростей процессов в исходной системе координат K и анизотропное описание — в системе K^* .

Действительно, появление анизотропного описания скоростей физических процессов в движущейся системе K^* не было результатом принятия специального соглашения, непосредственно касающегося этой системы отсчета. Мы лишь выбрали естественное соглашение об одновременности, соответствующее изотропному описанию скоростей процессов в исходной системе K , и затем приняли эту одновременность и соответствующие пространственные и временные масштабы для описания процессов во всех других инерциальных системах отсчета, движущихся относительно исходной системы со скоростью меньше скорости света. Нам могут, конечно, возразить, указав, что это последнее условие об использовании в различных инерциальных системах координат единой одновременности и одних и тех же масштабов и было тем специальным соглашением, которое предопределило появление анизотропного описания скоростей в системе координат K^* . Это утверждение, конечно, справедливо. Но данное условие было принято вовсе не специально для получения анизотропного описания скоростей процессов в системе K^* , а как *обязательное условие* для выявления тождественности различия в соответствующих физических процессах, воспроизведенных в различных инерциальных системах координат. Читатели, знакомые лишь с дорелятивистской механикой, твердо знают, что совпадение численных значений скоростей только в том случае означает их равенство, если для измерения пространственных и временных промежутков выбраны одни и те же единицы или когда пространственные и временные единицы отличаются в одинаковое число раз. Людям же, формально усвоившим ортодоксальную трактовку релятивистской кинематики, приходится доказывать, что равенство значений для скорости света в различных инерциальных системах имеет совсем иной смысл, не относящийся к сопоставлению этих величин между собой, поскольку при их измерении используются несовпадающие собственные пространственно-временные масштабы.

Использование единых пространственных и временных масштабов представляет, таким образом, необходимое условие прямого выявления различия в кинематике соответствующих процессов, воспроизведенных при одинаковых условиях в разных инерциальных системах отсчета. Это различие в кинематике носит всеобщий характер и не нарушает принципа относительности и равноправия инерциальных систем отсчета, находящихся в состоянии относительного движения. Мы, действительно, можем в движущейся системе отсчета выбрать одновременность, соответствующую удобному изотропному описанию скоростей процессов в этой системе коор-

динат (такую систему отсчета будем обозначать буквой K'). Но выбор этого соглашения вовсе не устранит выявленного различия в кинематике процессов. Использование собственных пространственных и временных масштабов системы отсчета K' для описания физических процессов относительно системы, принятой первоначально за исходную, приведет к появлению в описании их скоростей анизотропии, противоположной имевшей место в системе K^* . Иначе говоря, зависимость скоростей процессов от направления распространения в бывшей исходной системе координат описывается тем же соотношением (3) после замены в нем знака скорости v .

Именно переход к рассмотрению физических процессов в обеих системах отсчета в так называемых собственных пространственно-временных масштабах движущейся системы K' показывает невозможность объяснения ранее выявленного различия в кинематике процессов абсолютным движением системы K^* (K') относительно какой-либо выделенной системы координат. Полная равноправность инерциальных систем координат означает, что причиной различия в кинематике процессов в этих системах является их относительное движение. Первоначально принятое нами деление систем отсчета на исходную (неподвижную) и движущуюся имеет поэтому лишь условное значение. В любой из инерциальных систем координат может быть выбрано естественное и удобное изотропное описание кинематики происходящих в ней процессов, т. е. любая инерциальная система отсчета в этом смысле может занять в нашем рассмотрении место исходной системы. При этом объективно существующее различие в кинематике процессов проявится в появлении соответствующей анизотропии в описании аналогичных физических процессов, воспроизведенных в другой системе отсчета при непрямом, конечно, условии использования одних и тех же пространственно-временных единиц измерения в обеих системах отсчета.

От условного выбора исходной системы координат с изотропным описанием кинематики процессов зависит лишь конкретная форма выражения выявленного различия в кинематике процессов в различных инерциальных системах отсчета. Сама же сущность этого различия остается неизменной. Так, например, в первоначальном рассмотрении было установлено, что скорость света c в направлении оси x в системе K превышает на величину v скорость света $c - v$ в том же направлении относительно системы K^* . При переходе к собственным единицам измерения системы K' (K^*) скорость света в первой системе в том же направлении окажется равной $c + v$ и, следовательно, по-прежнему на величину v будет превышать скорость света c в том же направлении относительно второй системы. Таким образом, превышение скорости света в направлении оси x в первой системе на величину v по сравнению со скоростью света в том же направлении во второй системе отсчета действительно не зависит от произвольного выбора исходной системы координат с изотропным описанием кинематики процессов. Однако это превышение скорости света в первой системе вовсе не делает ее выделенной по сравнению со второй системой координат. Дело в том, что в противоположном направлении скорость света во второй системе отсчета $c + v$ (или c) оказывается всегда больше на величину v скорости света c (или $c - v$) соответственно в том же направлении относительно первой системы отсчета. Аналогичная равноправная ситуация для противоположных направлений в рассматриваемых системах отсчета имеет место и для скоростей распространения любых других физических процессов. *Все процессы в направлении относительного движения системы координат идут в одной системе медленнее, чем в другой, однако для противоположного направления имеет место обратная ситуация.*

Итак, различие в кинематике процессов, воспроизведенных в движущихся относительно друг друга инерциальных системах отсчета.

не является результатом каких-либо условных соглашений относительно выбора конкретных форм описания физических явлений. Оно составляет содержание основного объективного инварианта релятивистской теории, сущность проявления относительно движения систем в кинематических свойствах самих физических явлений. Это реально существующее различие в кинематике процессов удовлетворяет тому варианту подобия кинематических соотношений, при котором не нарушается равноправие систем отсчета и становится невозможно выделить по каким-либо абсолютным кинематическим эффектам одну из систем при сопоставлении соответствующих физических процессов, воспроизведенных в разных системах отсчета. Именно в учете этого различия в кинематике процессов и заключается содержание принципа относительности релятивистской теории. Подобно тому как в области геометрических соотношений различают понятия подобия и тождественности, необходимо и для кинематических соотношений различать эти понятия, определяющие соответственно содержание релятивистского принципа относительности Пуанкаре, Лоренца и Эйнштейна и классического принципа относительности Галилея.

На эту особенность выполнения принципа относительности для электромагнитных процессов было обращено внимание в работе Лоренца в 1904 г. Применение единых пространственно-временных масштабов для описания электромагнитных явлений как в исходной системе эфира, так и в движущейся относительно нее системе K^* позволило выявить различие процессов для этих систем, которое лишь по недоразумению было приписано Лоренцом влиянию абсолютного движения системы относительно эфира. Далее Лоренц показал, что, несмотря на это различие в описании процессов, никакими опытами в движущейся системе невозможно обнаружить ее движение относительно эфира. Но Лоренцом не был проведен анализ кинематического аспекта этой проблемы *). К сожалению, при дальнейшем развитии трактовки релятивистской теории совсем не было обращено внимания на то, что принцип относительности выполняется на основе подобия, а не тождественности кинематических соотношений. Только этим обстоятельством, на наш взгляд, можно объяснить, почему данная Пуанкаре (31, стр. 52) правильная оценка работы Лоренца 1904 г. не была поддержана другими учеными. Согласно общепринятому мнению Лоренц признан лишь предшественником Эйнштейна, а не одним из создателей теории относительности. В статье С. Гольдберга сделан даже вывод, что «теорию Лоренца нельзя рассматривать ни как предшественницу теории Эйнштейна, ни как ее предвестницу» (32, стр. 262). Мы не останавливаемся на критике такой крайне абсурдной точки зрения, поскольку она опровергается и самим фактическим материалом, приведенным в статье этого автора. В целом же недооценка работы Лоренца возникает из-за непонимания того, что использованный Лоренцом квазиклассический подход не только правомерен, но и представляет форму описания теории, наилучшим образом выявляющую кинематическую нетождественность физических процессов в разных инерциальных системах отсчета **).

*) Он обратил внимание лишь на геометрическое подобие преобразования пространственных отрезков в движущейся системе, не заметив принципиального значения фактически полученных им результатов для преобразования длительностей материальных процессов.

***) Между прочим, к частичному описанию релятивистских эффектов на основе соглашения, соответствующего преобразованиям Галилея, прибегают все без исключения авторы. Например, обычная демонстрация сокращения длины движущегося эталонного отрезка состоит в выражении его длины в масштабных единицах другой системы координат. В книге Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица «Теория поля» в § 37 для демонстрации «сплюсывания» поля равномерно движущегося заряда непосредственно вводится сопровождающая его система с масштабными единицами исходной си-

Мы подробно остановились на обсуждении этого вопроса, поскольку его выяснение необходимо для дальнейшего развития трактовки теории на основе решения проблемы отделения сущности содержания релятивистской теории от ряда положений, относящихся лишь к форме ее представления. Установление объективных инвариантов по отношению к действительно имеющейся произвольности выбора теоретических форм описания физических явлений доказывает, кроме того, необоснованность позитивистских попыток истолкования естественнонаучных соглашений традиционного представления релятивистской теории в духе философского конвенционализма.

Может показаться, что из приведенного в этой главе рассмотрения мы неправомерно исключили процессы, не связанные с какими-либо перемещениями в пространстве. По этому поводу следует заметить, что в природе, строго говоря, не существует физических процессов, не связанных хотя бы с малыми перемещениями в пространстве. Процессы, условно описываемые в качестве процессов, происходящих в точке (химические реакции, радиоактивный распад и др.), на самом деле связаны с перемещениями объектов внутри рассматриваемых физических систем. Поэтому требование кинематического подобия для таких процессов означает, что относительное изменение их скорости должно строго совпадать с общим для всех процессов относительным изменением в данной системе координат суммарного времени распространения на некоторое расстояние и обратно.

На самом же деле неполнота данной нами формулировки кинематического подобия процессов состоит только в том, что в целях упрощения мы ограничились рассмотрением лишь процессов с постоянными во времени скоростями. Выполнение же принципа относительности означает, конечно, сохранение кинематического подобия для любых физических процессов, в том числе для ускоренных движений. Кроме того, динамический процесс в том или ином виде предшествует возникновению рассмотренных нами движений материальных объектов с постоянными во времени скоростями. Поэтому с физической точки зрения, безусловно, более логично было бы начинать построение теории с формулировки релятивистской динамики в рамках классических представлений о времени и пространстве и установления на ее основе кинематического подобия в описании физических процессов в движущейся системе.

Первая часть этой задачи полностью была решена Лоренцем еще в 1904 г. Оставалось только рассмотреть, к какой кинематике в движущейся системе координат приводит принятый им динамический закон, затем обнаружить в этой кинематике полное подобие кинематике процессов исходной системы и на этой основе открыть подлинное содержание совершенно нового неклассического принципа относительности. И если бы Лоренц сделал этот шаг, то он непременно обнаружил бы несостоятельность выдвинутого им объяснения полученных релятивистских эффектов абсолютным движением тел относительно эфира.

Принципиальное значение трактовки теории, данной А. Эйнштейном, состояло в отрицании какой-либо роли эфира в возникновении релятивистских эффектов и в установлении относительного характера этих эффектов. По Лоренцу же строгое выполнение принципа относительности в движущейся системе координат есть результат воздействия эфира на

стемы. Подобное рассмотрение требует, конечно, последовательного проведения соглашения о единой одновременности. Нельзя говорить о сокращении плеча интерферометра при его повороте и не принимать скорость света, зависящей от направления. В настоящей статье обращается также внимание на важность подобного рассмотрения и кинематики произвольного физического процесса.

движущиеся материальные объекты. Детальный расчет этого воздействия создал полную видимость динамического описания причин возникновения релятивистских эффектов. Казалось бы, искусственность этого объяснения однозначно выявляется путем аналогичного рассмотрения, в котором система K' принимается за исходную. Тем не менее для некоторых ученых этого аргумента оказалось недостаточно, чтобы убедиться в мнимости наглядного объяснения релятивистских эффектов свойствами эфира. Неоднократно повторялись попытки дальнейшего «развития» именно этих слабых сторон работы Лоренца. И без привлечения эфира в самом динамическом подходе Лоренца некоторые увидели возможность развития материалистического причинного обоснования релятивистских эффектов (см., например, работы ^{33, 34}). Но беда в том, что сторонники такого подхода не объясняют основного свойства релятивистских эффектов — их относительности.

Л. Яноши детально рассмотрел динамическое описание в некоторой исходной системе координат изменений в материальной системе, ускоренной до скорости $v \sim c$. Такое рассмотрение вполне допустимо, конечно, и в рамках релятивистской теории. Но Л. Яноши, рассматривая поле электрического заряда, основывается на принципах, которые он относит только к свойствам электромагнитного поля, а не к общим свойствам материи, определяющим метрику пространства-времени. Поэтому автор приходит к выводу, что лоренцовы деформации возникают в результате ускорения системы и зависят от структуры электрона (³⁴, стр. 157). При такой постановке вопроса остается открытым вопрос о других полях, в частности, о полях, ответственных за сильные взаимодействия частиц. Подобная трактовка лоренцовых деформаций не только выдвигает ложное объяснение релятивистских эффектов, но и лишает теорию относительности основного ее преимущества — общности ее утверждений и возможности выхода ее предсказаний за конкретный экспериментальный материал, полученный еще до создания теории. Л. Яноши считает, что отсутствия *experimentum crucis*, отличающего его динамическое построение от теории относительности, вполне достаточно, чтобы по философским соображениям предпочесть именно его построение, отказавшись от теории относительности как теории пространства и времени. Однако существуют эксперименты в области ядерных и слабых взаимодействий, для которых построение Л. Яноши не предсказывает каких-либо конкретных результатов, в то время как теория относительности дает для них предсказания, прекрасно согласующиеся с опытом. Так, рост массы протонов со скоростью, разлет протонов после ядерного рассеяния под углом меньше $\pi/2$, время жизни быстрых частиц, распадающихся в результате процессов слабого взаимодействия, показывают правильность обобщения, полученного в теории относительности из полного отрицания абсолютного движения.

Л. Яноши делает шаг назад даже от работы Лоренца, в которой, несмотря на ошибочность интерпретации, содержалось обобщение полученных для электродинамики результатов. Только принимая это обобщение, можно будет доказать полную тождественность предсказаний теории Лоренца с предсказаниями теории относительности. Кроме того, как будет показано далее, доказательство правомерности использования в движущейся системе отсчета K^* координат $(x^*, y^*, z^*$ и $t^*)$, связанных с координатами исходной системы преобразования Галилея, вовсе не означает возврата к старым представлениям о пространстве и времени. Новые свойства релятивистской метрики в этом случае наглядно выражаются в кинематических соотношениях скоростей распространения различных процессов.

Что же касается выявления в работе Л. Яноша роли ускорения в возникновении лоренцовых деформаций, то строгое решение показывает, что появление этих деформаций в движущейся системе обеспечивает возможность выбора собственной метрики K' (x', y', z' и t'), по отношению к которой сокращенными будут уже отрезки исходной системы K . И, следовательно, объяснять уже придется сокращение отрезков системы, не подвергавшейся ускорению. На самом же деле и при расчете динамических эффектов речь должна идти об учете скорости лишь относительного движения материальных объектов.

Соотношение (3), описывающее угловую зависимость скоростей физических процессов, непосредственно может быть получено из принятого Лоренцом единого для всех объектов закона изменения массы от скорости движения объекта относительно исходной системы и постулата о сокращении пространственных отрезков. В данной статье мы ограничимся лишь качественным рассмотрением уравнения движения $dm\mathbf{W}/dt = \mathbf{F}$, в котором принят единый для всех объектов закон изменения инерциальной массы $m = m_0 [1 - (w^2/c^2)]^{-1/2}$ от скорости w относительно исходной системы координат K .

Рассмотрим, например, в системе K процесс ускорения электрона в ускорительной трубке, покоящейся в системе K^* . При ускорении электрона вдоль оси x происходит дальнейшее возрастание скорости электрона относительно системы K и, соответственно, дальнейшее увеличение его массы. При ускорении же в противоположном направлении происходит уменьшение скорости электрона относительно системы K , соответственно падает его масса и возрастает получаемое им в дальнейшем ускорение. Простейшие расчеты процесса ускорения приводят к различию скоростей электрона относительно системы K^* для углов 0 и π , соответствующему соотношениям (4).

2. П р е о б р а з о в а н и я Л о р е н ц а. Следуя рекомендации Пуанкаре (¹, стр. 13) выбирать определение одновременности, соответствующее наиболее простой формулировке физических законов, мы смогли, однако, получить удобное изотропное описание кинематики только в одной из инерциальных систем отсчета. В силу свойств самих физических явлений удобные изотропные описания кинематики процессов в различных инерциальных системах координат в единых пространственно-временных масштабах невозможно получить при выборе любых соглашений. Тот факт, что во всех других инерциальных системах координат, движущихся относительно исходной, возникает анизотропное описание скоростей соответствующих физических процессов, есть сюрприз природы, составивший основное содержание релятивистской теории пространства и времени. Для выяснения важных моментов трактовки теории мы прибегли к выражению этого содержания на языке пространственно-временных соотношений классической механики, доказав предварительно допустимость соответствующего соглашения. В настоящем разделе будет показано, что удобное простейшее описание явлений в каждой системе отсчета, иначе говоря, использование сразу многих соответствующих соглашений относительно одновременности событий, становится возможным за счет перехода к новым пространственно-временным соотношениям релятивистской теории.

Таким образом, сам факт количественного различия в ходе физических процессов в этих системах имеет абсолютный характер и не может быть устранен выбором любых пространственно-временных базисов, использующих единую одновременность для всех систем отсчета. С другой стороны, в каждой инерциальной системе отсчета среди множества возможных

определений одновременности событий существует только одно, выделенное в том отношении, что оно обеспечивает удобное изотропное описание физических процессов только в данной системе координат *). Собственная одновременность в каждой системе координат может быть установлена путем синхронизации часов с помощью любого физического процесса в предположении независимости его скорости от направления, а также путем бесконечно медленной транспортировки в разные точки пространства часов, предварительно синхронизированных в одной точке **).

Два происшедших в мире события, удовлетворяющие условию собственной одновременности одной системы координат, оказываются, конечно, не одновременными по критериям собственных одновременностей других инерциальных систем координат. Казалось бы, совместное использование удобных в каждой системе координат собственных пространственно-временных базисов нарушает основное соглашение об использовании единой одновременности, обеспечивающей необходимую однозначность описания физических явлений. Однако однозначность описания будет строго соблюдена и при совместном использовании отличающихся друг от друга собственных пространственно-временных базисов различных систем отсчета, если только при переходе от описания какого-либо процесса в одной системе координат к описанию того же самого физического процесса относительно другой системы координат всякий раз будет учитываться различие используемых собственных пространственно-временных базисов. А это и означает необходимость вслед за соглашением об использовании удобных собственных пространственно-временных базисов систем отсчета принять вместо преобразований Галилея пространственно-временные преобразования Лоренца, в которых и учтено объективно существующее различие в ходе соответствующих процессов в этих системах координат. В использовании собственных пространственно-временных базисов и состоит основное соглашение, принятое в традиционном представлении специальной теории относительности, обладающем, помимо простоты, важным преимуществом полноты выражения новых свойств пространственно-временной метрики. Ценой использования различных несовпадающих пространственно-временных базисов (использования различных одновременностей и соответствующих им пространственных и временных масштабов) удастся получить в каждой инерциальной системе координат простейшее изотропное описание кинематики процессов.

Основное удобство этой традиционной формы представления состоит в использовании хотя и не совпадающих между собой, но зато физически эквивалентных пространственных и временных масштабов ***). Если отвлечься от факта различного протекания физических явлений в движущихся относительно друг друга системах отсчета, то можно в каждой такой системе установить эквивалентные единицы измерения пространства и времени, определяемые непосредственно физическими эталонами. Например, за единицу измерения длины в каждой системе координат можно взять постоянную решетки кристалла хлористого натрия, покоящегося в данной

*) Такую одновременность мы будем называть в дальнейшем собственной одновременностью данной системы отсчета.

***) Вместе с тем любая другая (отличная от собственной) одновременность устанавливается той же процедурой синхронизации часов произвольным физическим процессом в предположении, что величина его скорости зависит от направления в соответствии с соотношением (3). Элементарный расчет позволяет вычислить также величину поправки на рассинхронизацию часов при сколь угодно медленной их транспортировке в разные точки пространства, которая соответствует выбранной анизотропии скоростей физических процессов.

****) Как было отмечено М. Борном, эта особенность поднимает теорию относительности «выше уровня простой условности» (35, стр. 305).

системе координат, или длину волны определенной линии спектра атомов кадмия, также покоящихся в данной системе координат. Аналогично можно выбрать в каждой системе координат и соответствующие природные эталоны длительности. Установленные таким образом удобные единицы измерения и будут соответственными пространственно-временными масштабами, используемыми в традиционном представлении специальной теории относительности. Подобные эталоны обычно называют одинаковыми. На самом же деле в более точном определении следует говорить об их физической эквивалентности, так как их отличие или совпадение предопределяется принятым соглашением. Такие физически эквивалентные масштабы обеспечивают в каждой инерциальной системе координат описание процессов на одном и том же физическом языке, что и приводит к совпадению описаний аналогичных (соответствующих) физических процессов в разных инерциальных системах отсчета. И только при пересчете величин, измеренных в одной системе отсчета, в другую систему приходится вспоминать, что использованные единицы измерения — сантиметры и секунды — вовсе не совпадают по величине с единицами тех же названий в другой системе отсчета. Своеобразие этого различия в собственных пространственно-временных масштабах систем состоит в том, что оно, естественно, не нарушает исходного положения о физической равноправности движущихся друг относительно друга инерциальных систем. Различие, нетождественность собственных времен двух систем $t \neq t'$ нельзя выразить простым неравенством типа $t > t'$ или $t < t'$, нарушающим фактически равноправность систем. Иначе говоря, нельзя утверждать, что в какой-либо инерциальной системе процессы идут быстрее, чем соответствующие процессы в другой системе. Как мы видели, различие в ходе процессов в системах, находящихся в относительном движении, состоит в том, что в одной из систем процессы в направлении их относительного движения идут медленнее, чем соответствующие процессы в другой системе, в то время как для противоположного направления имеет место обратное соотношение между скоростями распространения процессов. Это различие уже по самой своей сути не может нарушать равноправие систем. Следовательно, и соотношения между собственными пространственно-временными масштабами систем должны выражать этот же факт различия скоростей распространения процессов в соответствующих направлениях относительно разных систем отсчета. Но это свойство невозможно выразить, если не ввести понятия собственного времени в каждой точке системы координат t_x и $t_{x'}$. Отсюда и возникла необходимость введения наглядного образа синхронизированных часов, расставленных в различных точках каждой системы отсчета. Все часы одной системы отсчета характеризуются определенным общим темпом их хода и определенным соотношением начальных показаний часов в различных точках системы. Но и собственное время t_x в конкретной точке одной системы невозможно непосредственно сравнить с собственным временем в определенной точке другой системы $t_{x'}$. Ясно, что сама возможность такого сравнения противоречила бы равноправию систем отсчета, так как при $t_x \neq t_{x'}$ у нас не было бы иного выбора, как принять одно из неравенств $t_x > t_{x'}$ или $t_x < t_{x'}$, нарушающих равноправие систем. Но, несмотря на это, совершенно редким исключением являются курсы по теории относительности, авторы которых удержались от следующей упрощенной формулировки релятивистского замедления времени, противоречащей всему духу теории относительности: движущиеся часы идут медленнее неподвижных. Допущенное в этой нечеткой формулировке нарушение равноправия систем отсчета не может быть устранено ссылками на произвольность выбора наблюдателем неподвижной и движущейся систем.

Оставляя в стороне возникшие на этой основе ложные идеалистические выводы о субъективности понятия времени, мы хотели бы обратить внимание на недопустимость в такой точной науке, как физика, подобных упрощений формулировок, искажающих физическую суть установленных закономерностей. В действительности в специальной теории относительности речь идет о сопоставлении интервала времени, прошедшего в одной точке какой-либо системы отсчета, с разностью времен, прошедших в разных точках другой системы отсчета. Иначе говоря, в сопоставлении всегда участвуют по крайней мере двое часов, двое из которых синхронизированы согласно собственной одновременности какой-либо системы отсчета. Получаемый в таком сопоставлении результат однозначен, не зависит ни от каких точек зрения наблюдателей и полностью согласуется с равноправностью инерциальных систем отсчета. Взятые в единственном числе часы в определенной точке какой-либо системы отсчета всегда отстают от совместных показаний пары синхронизированных часов другой системы. При этом результат подобного сопоставления может однозначно быть зафиксирован наблюдателями из самых разных инерциальных систем. Конечно, получаемый при сравнении часов результат непосредственно зависит от соглашения относительно одновременности событий, поскольку в соответствии с этим соглашением выбираются одновременные показания часов, по одним из которых замеряется начало, а по другим — конец сравниваемого интервала времени. Но если уже принято конкретное соглашение, например, выбрана собственная одновременность, соответствующая изотропному описанию процессов в каждой системе координат, то обсуждаемое сравнение часов дает определенный результат, являющийся экспериментальным фактом, не зависящим от наблюдателей *). Не следует только этот результат выдавать за экспериментальное подтверждение принятой конвенции.

Показывающие собственное время в разных системах отсчета часы отличаются принятой в каждой системе расстановкой начальных показаний и темпом их хода. При этом последнее различие не имеет абсолютного значения, не зависящего от выбора той или иной одновременности для описания самого сопоставления часов двух систем отсчета. Сравнение часов системы K с часами другой системы K' с его однозначным приведенным выше результатом можно представить самым различным образом. Мы можем описать это сравнение, основываясь на собственной одновременности системы K , когда темп ее часов будет принят более быстрым. Тогда в некоторый начальный момент по одновременности системы K все часы этой системы показывают одно и то же время t_1 , а часы системы K' имеют различное показание в зависимости от места их расположения $t'_1(x) = t'_1(0) - (v^2/c^2)x'$. В последующий момент сравнения имеем одинаковое увеличение показаний часов системы K на величину Δt и часов системы K' на $\Delta t' = \Delta t [1 - (v^2/c^2)]^{1/2}$ с одновременным перемещением их по отношению к часам системы K . При этом обнаруживается не только более медленный ход отдельных часов системы K' по отношению к паре часов системы K , но и отставание каждых отдельных часов системы K , сравниваемых во второй момент с поставленными с «опережением» другими часами системы K' . То же самое сравнение с его однозначным результатом мы можем изобразить, основываясь на собственной одновременности системы K' , когда более быстрым будет принят темп часов этой системы.

*) Это утверждение о проверяемых на опыте предсказаниях, сделанных в рамках определенной конвенции, вполне согласуется с точкой зрения Пуанкаре, изложенной в книге Л. Ружье «Философия геометрии Анри Пуанкаре»³⁶ (см. также книгу А. Грюнбаума¹⁸, стр. 158).

Таким образом, неизменным остается лишь факт относительного различия собственных одновременностей рассматриваемых систем отсчета и сам результат сравнения часов, что выражает в рамках конкретного соглашения реально существующее различие в скоростях распространения соответствующих процессов в движущихся друг относительно друга инерциальных системах.

Аналогичная ситуация, удовлетворяющая равноправию систем отсчета, имеет место и для соотношения собственных пространственных масштабов разных систем, которое также не может быть строго сформулировано без учета возникшей связи пространственных координат с временными. Понятие длины движущегося в некоторой системе пространственного отрезка, выраженной в собственном пространственном масштабе этой системы, по самой своей сути связано с собственной одновременностью системы. Эталон длины отрезка вдоль оси x' системы K' при одновременной фиксации положений его концов в системе отсчета K (отвечающей условно выбранной собственной одновременности этой системы) оказывается короче эквивалентного эталона длины в системе K . Так же как и при сравнении показаний часов, этот конкретный результат измерения будет засвидетельствован любыми наблюдателями независимо от их принадлежности к той или иной инерциальной системе отсчета. Однако вывод об абсолютном сокращении эталонного отрезка системы K , как известно, сделать нельзя, так как совершенно такое же сокращение обнаруживается при одновременной фиксации положений в системе K' концов эталонного отрезка системы K , если только используется условно выбранная собственная одновременность системы K' . Этот конкретный результат измерений также может быть зафиксирован любыми наблюдателями. Значит, дело здесь вовсе не в наблюдателях и не в их точках зрения, а в факте относительного движения систем координат и в выборе различных соглашений относительно определения одновременности событий в каждой системе координат. В данном случае очевидно, что тождественность в языковом отношении выбранных определений одновременности в каждой системе отсчета означает лишь установление физически эквивалентных одновременностей, а не тождественно совпадающих одновременностей.

Рассмотрим теперь, в какой мере результат сопоставления физически эквивалентных эталонов длины зависит от изменения используемого соглашения относительно одновременности событий и соответствующих ей масштабов. Ничто не может помешать выбрать, например, в системе K^* (K') одновременность, совпадающую с собственной одновременностью системы K , и установить масштаб длины вдоль оси x^* совпадающим с масштабом системы K . В этом случае при одновременной фиксации в системе K положений концов неподвижного в системе K^* отрезка единичной длины будет получена величина, совпадающая с единицей длины. Но исчезло ли при этом прежнее сокращение физически эквивалентного эталона длины? По определению, для выбранных масштабных единиц в данном случае не должно происходить никакого сокращения. Однако если мы рассмотрим в системе K^* эталонную величину длины отрезка, созданного самой природой, например, величину постоянной решетки определенного кристалла, покоящегося в этой системе K^* , то обнаружим, что в выбранных масштабных единицах она выражается меньшей величиной, чем аналогичная физическая величина в тех же масштабных единицах для кристалла, покоящегося в системе K .

Таким образом, в отношении сравнения длин физических эталонов в этих системах отсчета, по существу, ничего не изменилось с переходом к новой конвенции относительно одновременности. Однако это уменьшение длины физического эталона вдоль оси x^* обнаружится теперь при

сопоставлении в той же системе K^* с тем же эталоном длины в других направлениях. Это и есть лоренцова постановка вопроса о сокращении длин твердых тел, которая принципиально ничем не отличается от традиционной постановки вопроса. Это есть лишь другая, но столь же правомерная форма представления тех же релятивистских эффектов *). Конечно, этой формой представления сразу подсказывается ложный путь объяснения сокращения эталонных отрезков абсолютным движением системы K^* . Но несостоятельность такого объяснения становится очевидной после рассмотрения другой конвенции об использовании собственной одновременности K' в обеих системах отсчета. В этом случае мы обнаруживаем аналогичную ситуацию сокращения эталонного отрезка для направления вдоль оси x уже другой системы координат.

Бессмысленно ставить вопрос об однозначном определении какого-то действительного соотношения эквивалентных этапов протяженности разных систем отсчета; сопоставление их длин всегда основывается на использовании условного соглашения об одновременности.

Столь же важно убедиться в невозможности непосредственного сопоставления природных эталонов длительности разных инерциальных систем, не зависящего от принятого соглашения об одновременности. Как уже отмечалось, непосредственное сравнение временных эталонов в определенных точках двух инерциальных систем отсчета невозможно. Рассмотренное же выше сопоставление показаний отдельных часов одной системы с показаниями пары часов другой системы включает синхронизацию их начальных показаний в соответствии с условно выбранной собственной одновременностью данной системы отсчета. Однако в рамках специальной теории относительности возможен еще один способ сравнения длительностей, в котором также участвует не менее трех часов, но относящихся уже к различным инерциальным системам. Мы имеем в виду так называемый «парадокс» часов, когда после непосредственного сравнения показаний двух часов в одной точке они разлетаются с постоянной скоростью относительно друг друга, а затем по прошествии некоторого времени состояние одних из них меняется таким образом, что относительная скорость их движения изменяет знак, после чего при встрече часов производится второе сравнение их показаний. Вопрос о правомерности рассмотрения этой задачи в рамках специальной теории относительности был в свое время основательно запутан, и лишь в конце пятидесятих годов в этот простой вопрос была, наконец, внесена необходимая ясность³⁷. Прежде всего было выяснено отсутствие каких-либо оснований считать получаемый в данной задаче результат парадоксальным с точки зрения специальной теории относительности, так как перевод одних часов в другое инерциальное состояние движения означает, что в рассматриваемом сопоставлении участвуют трое часов, покоящихся в различных инерциальных системах координат **).

В этом сопоставлении не участвуют покоящиеся в одной системе часы, начальные показания которых устанавливаются в соответствии

*) Отметим в связи с этим совершенно ошибочную интерпретацию опыта Кеннеди — Торндайка, проведенного в 1932 г. с интерферометром типа Майкельсона, но с разными длинами плеч. Вопреки мнению А. Грюнбаума¹⁸, стр. 487) для полной полноты лоренцева подхода к теории относительности не требуется никакой дополнительной гипотезы о замедлении времени, так как оно автоматически получается при данном соглашении об использовании единой одновременности.

**) Кажущаяся парадоксальность получаемого результата появляется только в формулировке задач в рамках общей теории относительности³⁷. В работе К. Мёллера³⁸ было показано, что последовательное применение к этой задаче формализма общей теории относительности позволяет получить тот же результат, который тривиальным образом вытекает из положений специальной теории относительности.

с каким-либо соглашением об одновременности событий. Получаемый результат при таком сравнении физически эквивалентных эталонов длительности не включает дополнительных соглашений, кроме соглашения о выборе физически эквивалентных собственных единиц измерения в каждой системе координат. Пусть в качестве единицы собственного времени в каждой системе отсчета принят период полураспада определенного радиоактивного вещества. В начальный момент встречи выбранных часов K и K' (событие 1) производится измерение интенсивности радиоактивного распада каждого источника. В следующий рассматриваемый в этой задаче момент радиоактивный источник K' , удаляющийся от K со скоростью v , встречается с третьим источником K'' (событие 2), движущимся в противоположном направлении с той же абсолютной скоростью относительно первого источника K . В момент события 2 производится измерение интенсивностей источников K' и K'' . Предположим для простоты, что это измерение показало уменьшение интенсивности источника K' по сравнению с начальной ровно в два раза. Следовательно, интервал времени $\Delta t'_{12}$ между рассматриваемыми событиями равен одной единице принятого нами масштаба измерения собственного времени.

Рассмотрим теперь заключительный момент встречи радиоактивного источника K'' с K (событие 3). В этот момент будет обнаружено уменьшение интенсивности источника K'' ровно в два раза по сравнению с его интенсивностью в момент события 2. Следовательно, интервал времени $\Delta t'_{12} + \Delta t'_{23}$ между событиями 1 и 3, определенный как сумма показаний физически эквивалентных радиоактивных часов K' и K'' , равен двум единицам собственного времени.

Эквивалентный радиоактивный источник K согласно теории относительности должен к моменту события 3 уменьшить свою интенсивность более чем в четыре раза. Если, например, скорость $v = \sqrt{0,75}c$, то источник K к этому моменту уменьшит интенсивность в 16 раз, и, следовательно, интервал времени Δt_{13} по часам K будет равен четырем единицам собственного времени.

Какой же вывод можно сделать из этого результата сопоставления трех физически эквивалентных эталонов собственного времени? В научной литературе неоднократно обсуждались самые различные аспекты этой задачи. Дж. Уитроу совершенно правильно отмечает, что огромная литература по обсуждению этого «парадокса» уступает по своему объему лишь литературе, посвященной парадоксам Зенона (²⁷, стр. 277). Однако недавно в статье Н. С. Лебедевой и В. М. Морозова ³⁹ было обращено внимание на ранее не обсуждавшийся вопрос, выяснение которого имеет непосредственное отношение к излагаемому в настоящей работе уточнению формулировки теории относительности. Эти авторы пришли к заключению, что по крайней мере одни из эталонных часов K' или K'' идут медленнее часов K . Отсюда, по их мнению, следует, что исходное положение теории относительности о полной тождественности одинаковых часов в различных инерциальных состояниях движения не соответствует даваемому той же теорией результату их абсолютного сравнения, и, следовательно, «логическая структура этой теории дефектна» (³⁹, стр. 84). В заключение авторы приходят к выводу о существовании абсолютной «иерархии инерциальных состояний по скорости перемещения в пространстве» (³⁹, стр. 87).

Действительно, рассмотренное сравнение показаний трех часов можно считать абсолютным в смысле независимости от соглашения об одновременности событий в соответствующих инерциальных системах координат. Заключение же, касающееся сравнения часов K с одними часами K' или K'' , использует определенное предположение об одновременности событий

в системе, где часы K покоятся. Так, принимая для интервала времени Δt_{12} значение, равное Δt_{23} , иначе говоря, считая, что событию 2 соответствует уменьшение интенсивности источника K в четыре раза, мы получим, что часы K' и часы K'' идут в два раза медленнее часов K . Любое другое возможное соглашение относительно момента события 2 будет означать принятие предположения о том, что одни из часов K' или K'' идут еще медленнее.

Само неравенство $\Delta t_{13} > \Delta t'_{12} + \Delta t''_{23}$ представляет собой проверяемое на опыте утверждение, не зависящее от соглашений относительно одновременности событий.

Представляя себе, что для каждой пары часов есть хотя и не известное нам, но вполне определенное соотношение темпов их хода, авторы работы³⁹ пришли к выводу, что по крайней мере одни из часов K' или K'' в действительности идут медленнее часов K . На самом же деле заключение о соотношении темпов хода любой пары часов из трех, участвующих в этом сравнении, всегда условно. Так же как не существует даже в одной инерциальной системе координат действительной одновременности для разноместных событий, по той же самой причине отсутствует и какое-либо объективно выделенное действительное соотношение темпов хода физически эквивалентных часов, находящихся в различных инерциальных состояниях. Для любой пары из трех рассматриваемых эталонных часов можно условно принять равенство темпов их хода. Это есть вопрос соглашения. Абсолютен лишь вывод о невозможности соглашения о равенстве темпов хода всех трех физически эквивалентных часов, мировые линии которых образуют треугольник. И в этом действительно проявляется различное инерциальное состояние часов по отношению друг к другу, а не по отношению к какому-либо абсолютному пространству, как это ошибочно предположили авторы работы³⁹. Обсуждавшееся нами выше абсолютное превышение скоростей распространения физических процессов для определенного направления в одной системе отсчета по сравнению со скоростями распространения в том же направлении в другой инерциальной системе отсчета с необходимостью приводит к неравенству $\Delta t_{13} > \Delta t'_{12} + \Delta t''_{23}$, не позволяющему принять одинаковым темп хода всех трех участвующих в сравнении часов. Отсюда, конечно, следует, что при измерении собственного времени в различных инерциальных системах речь должна идти не об абсолютно тождественных, а о физически эквивалентных часах. И лишь в отсутствии четких разъяснений по этому поводу можно обвинить общепринятую трактовку теории относительности. Но этот недостаток не следует относить к дефектам логической структуры построения теории, так как в ней фактически используется именно физическая эквивалентность часов, а не их тождественность.

Непосредственные алгебраические выражения, связывающие собственные пространственно-временные координаты одной инерциальной системы с собственными координатами другой системы, могут быть найдены из соотношения (3) при рассмотрении любого физического процесса. Преобразования при этом находятся из условия, что скорость некоторого процесса в движущейся системе K^* , равная при определении по времени исходной системы u^* (θ^*), в случае определения в собственных пространственно-временных единицах системы K' , должна быть равна независимо от направления движения той же величине, что и скорость аналогичного физического процесса в исходной системе, т. е. равна u . Обычно при выводе преобразований Лоренца так всегда и поступают, но только вместо произвольного физического процесса рассматривают соотношение (4) лишь для распространения света, когда $u = c$. Отсюда и получается ложное впечатление, что приводимые в обоснование новых физических

свойств пространства и времени рассуждения об особой роли световой сигнализации и о принципиальном значении выбора измерительной операции имеют будто бы отношение к самому физическому содержанию теории.

Это заблуждение об особом значении световой сигнализации для осуществления в природе неразрывной связи пространства и времени настолько велико, что некоторые авторы попытались даже исключить из процедуры сигнализации элемент, связанный с субъектом, за счет возложения его функции на сами тела: «фон излучения», «обмен сигналами» между телами определяет их взаимную координацию в пространстве и времени»⁴⁰. На самом же деле уникальная роль процесса распространения света для определения преобразований Лоренца отрицается уже тем, что для этой цели пригоден и любой другой физический процесс*). Кроме того, следует понимать, что произвольно выбранный процесс выступает здесь не в виде непосредственной сигнализации, а как связующее звено в теоретическом построении, устанавливающем соотношения между собственными пространственно-временными величинами в различных движущихся системах.

В приложении Б приведены расчеты, показывающие, каким образом может быть осуществлен переход от соотношения (3), описывающего реальные относительные изменения в движении материи, к преобразованиям Лоренца, отражающим связь между собственными пространственно-временными базами движущихся относительно друг друга систем координат. Это и есть вывод преобразований Лоренца на основе сформулированных в рамках прежних представлений о времени и пространстве всеобщих свойств физических процессов, отвечающих исходным постулатам теории**). Такой путь получения преобразований Лоренца дает возможность избежать отмеченную еще Эйнштейном⁴¹ нелогичность выделения из всего мира физических процессов собственных масштабов и часов. Но самое главное на этом пути построения теории, помимо четкого выявления принятых соглашений,— это установление того факта, что формальная одинаковость кинематического описания в собственных масштабах соответствующих физических процессов в движущихся относительно друг друга системах отсчета означает всеобщность, универсальность того различия в скоростях этих процессов, которое выражается в релятивистских соотношениях, связывающих собственные пространственно-временные координаты инерциальных систем отсчета.

В самом деле, абсолютные величины скоростей в этом случае определяются отношениями собственных пространственных промежутков к собственным временным интервалам в соответствующих системах отсчета. И совпадение полученных значений, конечно, не доказывает равенства скоростей соответствующих процессов в различных системах отсчета в силу несовпадения использованных собственных пространственно-временных масштабов. Поэтому постоянство скорости света относительно различных инерциальных систем означает только неизменность в каждой системе отсчета отношения скорости этого процесса к скоростям других соответствующих физических процессов и вовсе не означает, что луч света идет с одной и той же скоростью относительно двух движущихся систем координат. Ведь нельзя же, в самом деле, принимать численное

*) Это обстоятельство в свое время отмечалось Эйнштейном (4, стр. 148) и Паули (5, стр. 22).

***) Отличительная особенность этого вывода, впервые приведенного в работе²⁸, состоит в том, что он основан на рассмотрении скорости распространения произвольного физического процесса.

совпадение значений двух физических величин за их равенство, если это совпадение достигнуто за счет выбора неравных единиц измерения.

Для скоростей, измеренных в собственных масштабах различных инерциальных систем, действует такой же закон сложения, как для сложения векторов в геометрии Лобачевского. Таким образом, созданная еще в первой половине прошлого века Н. И. Лобачевским неевклидова геометрия непосредственно осуществляется в «пространстве скоростей» релятивистской механики^{42, 43}. Интересно, что сам Н. И. Лобачевский, значительно опережая также и развитие физики, гениально предвидел возможность связи «воображаемой» геометрии с новыми закономерностями механики.

Отличие релятивистской формулы сложения скоростей, измеренных в разных системах координат, от классической формулы простого сложения величин скоростей как раз и обусловлено учетом различия использованных пространственно-временных масштабов. Особенность сложения величин скоростей в теории относительности — той же самой природы, что и особенность вычисления общего суммарного расстояния, если одна его часть измерена в морских, а другая — в сухопутных милях.

Если же нам известна скорость u^* (0) какого-либо процесса вдоль оси x^* системы K^* , измеренная в масштабных единицах, совпадающих с собственными единицами системы K , то скорость этого процесса относительно системы K будет определяться простой суммой $v + u^*$ (0), что и приводит, согласно (4), к релятивистской формуле суммирования величин v и u :

$$w(0) = v + u^*(0) = v + u \left\{ 1 - \frac{v^2/c^2}{1 + (uv/c^2)} \right\} = \\ = (v + u) / \left[1 + (uv/c^2) \right].$$

Следует заметить, что в физике встречаются нередко задачи, в которых, как все исходные данные, так и искомая величина относятся к одной и той же системе координат. Например, подобная задача встречается в импульсной технике при определении времени совпадения двух электрических импульсов, распространяющихся по высокочастотному кабелю навстречу друг другу. К этому же виду принадлежит и задача подсчета числа соударений во встречных пучках частиц в лабораторной системе координат. При решении этих задач, несмотря на то, что фигурирующие в них скорости соизмеримы со скоростью света, действует закон простого сложения этих скоростей. К этому результату обычно приходят на основании использования преобразований Лоренца, обращение к которым в данном случае, конечно, излишне. Удивление же полученный результат вызывает только из-за непонимания, что релятивистская формула сложения скоростей должна применяться не вообще для скоростей, соизмеримых со скоростью света, а для скоростей, измеренных в разных системах отсчета в собственных пространственно-временных масштабах.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Еще раз подчеркнем, что преобразования пространства и времени специальной теории относительности выражают те общие различия в ходе физических процессов в движущихся относительно друг друга инерциальных системах координат, которые в силу сохранения полного кинематического подобия не нарушают принцип относительности. Обусловлено же это различие в ходе физических процессов конечной скоростью распространения взаимодействия и возникающей из-за этого зависимостью взаимодействия от скорости относительного движения материальных объектов.

Это различие в ходе соответствующих физических процессов для двух движущихся относительно друг друга инерциальных систем отсчета мы выразили в виде анизотропного описания скоростей процессов в одной из систем. Для этого мы, так же как и Лоренц в своей работе 1904 г., воспользовались в движущейся системе K^* пространственно-временными координатами x^* , y^* , z^* и t^* , связанными с координатами исходной системы K преобразованиями Галилея $x^* = x - vt$, $y^* = y$, $z^* = z$ и $t^* = t$. Далее мы показали, что переход к собственным координатам x' , y' , z' и t' , связанным с координатами исходной системы преобразованиями Лоренца, и означает учет в метрике пространства-времени всеобщего различия в ходе процессов.

Имеется еще одна простейшая возможность убедиться в справедливости этого утверждения, которую, как мы полагаем, было бы целесообразно использовать при построении школьного курса по теории относительности. Для этого нужно с помощью преобразований Лоренца пересчитать данные в собственных координатах, относящихся к процессам в движущейся системе K' , в исходную систему координат K , т. е. описать в координатах x , y , z и t результаты наблюдений в системе K произвольных физических процессов, воспроизведенных в стандартных условиях в системе K' . Относящиеся к этой задаче простейшие выкладки представлены в приложении В. Из них наглядно видно, что выполнение принципа относительности в движущейся системе K' вовсе не отрицает предсказаний классической физики относительно процесса распространения света, которые строго выполняются при описании явления в координатах x и t исходной системы K .

Этот подход (описание в координатах x , y , z и t) дает такие же возможности, как и примененный нами ранее способ выявления различия в ходе физических процессов в системах K и K' за счет описания в координатах x^* , y^* , z^* и t^* , связанных преобразованиями Галилея с координатами исходной системы. Но использование сопровождающей инерциальной системы преобразований Галилея препятствует возникновению ложного объяснения наблюдаемых кинематических эффектов не общими свойствами самих физических явлений, а условиями наблюдений из другой системы координат.

Возможность представления релятивистской кинематики физических процессов на основе применения преобразований Галилея была показана в нашей работе 1961 г.²⁸ Формулировка специальной теории относительности с помощью преобразований Галилея была дана также в работе⁴⁴. Конечно, с точки зрения принципа общей ковариантности описание релятивистских эффектов с помощью группы Галилея представляется, в принципе, столь же тривиальным, как и возможность теоретических описаний физических явлений, использующих различные единицы измерений физических величин*). Здесь мы, однако, хотели бы самым категорическим образом подчеркнуть, что доказательство такой возможности описания совсем не означает возврата к дорелятивистским представлениям о пространстве и времени. Мы должны разочаровать все еще встречающихся противников признания релятивистской теории тем, что преобразования Галилея были использованы нами лишь как вспомогательное средство для выяснения тех конкретных всеобщих свойств кинематики физических процессов, которые определяют специфику релятивистских преобразований Лоренца.

*) Между тем, в противоречие с этим общепризнанным принципом во многих курсах по специальной теории относительности отрицалась возможность объединения исходных постулатов теории при использовании прежних преобразований Галилея.

Никакой эксперимент действительно, в принципе, не может выделить из этих двух математических преобразований одно как истинное. Однако сопоставление с экспериментом позволяет однозначно установить, что преобразования Лоренца более полно отражают физические свойства реального пространства и времени. Всю совокупность известных экспериментальных фактов мы можем точно описать, пользуясь преобразованиями Галилея, но при этом для инерциальных систем, движущихся относительно исходной, нам придется вводить общие, универсальные изменения в кинематику физических процессов. А это и означает, что преобразования Галилея недостаточно полно отражают установленные на опыте свойства пространства-времени, поскольку не учтенные ими всеобщие кинематические свойства по самому определению есть свойства пространства и времени. Общность изменений кинематики процессов в одной системе отсчета по отношению к физически эквивалентным процессам в другой системе мы учитываем непосредственно, когда переходим к собственным пространственным и временным масштабам в каждой системе отсчета и устанавливаем для них связь, описываемую преобразованиями Лоренца.

Как было показано в нашей работе ², допустимый произвол в выборе метрических средств описания физической реальности вовсе не снимает вопроса о том, какова пространственно-временная метрика реального мира.

Пуанкаре был совершенно прав, утверждая, что «всякий опыт допускает истолкование на почве евклидовой гипотезы, но он допускает его и на почве гипотезы неевклидовой» (⁴⁶, стр. 89). В частности, он считал, что опыт по наблюдению параллакса удаленной звезды может быть интерпретирован в любой из геометрий путем внесения соответствующих изменений в законы оптики. Однако Пуанкаре не проанализировал тот важнейший для науки случай, когда для согласования с опытом требуется вносить изменения во все физические уравнения движения, приводящие к соответствующим всеобщим изменениям в описании кинематики физических процессов. Именно по этой причине он пришел к идеалистическому выводу о том, что «не природа дает (или навязывает) нам понятие пространства и времени, а мы даем их природе» (⁴⁵, стр. 7).

А. Эйнштейн ⁴⁶, А. Эддингтон ⁴⁷, А. А. Фридман ⁴⁸ и другие ученые, обсуждавшие проблему соотношения геометрии и физического опыта, не приняли эту точку зрения А. Пуанкаре, основываясь на признании органической связи общей теории относительности с неевклидовой геометрией Римана. Но их совершенно правильная уверенность в существовании определенной геометрии физического пространства, оказывается, вовсе не противоречит признанию исходного тезиса Пуанкаре о возможности интерпретации результатов опыта на основе любой геометрии. Справедливость этого тезиса может быть строго доказана. В настоящей статье мы показали возможность интерпретации в рамках преобразований Галилея эффектов специальной теории относительности. В работах У. Тирринга ⁴⁹, В. И. Огиевского и И. В. Полубаринова ⁵⁰ была получена в рамках евклидовой геометрии формулировка релятивистской теории тяготения, полностью тождественная в отношении любых наблюдаемых эффектов общей теории относительности Эйнштейна. Обсуждению возможности изоморфных представлений релятивистской теории гравитации посвящены также работы М. Тоннелá ⁵¹ и А. З. Петрова ⁵².

Каким же образом можно совместить представления о существовании определенной геометрии физического пространства и определенной пространственно-временной метрики физического мира с возможностью конвенционального выбора геометрии и метрики для описания физических явлений? Эта проблема не получила окончательного решения, хотя иссле-

дования Г. Рейхенбаха¹⁶ в значительной мере подготовили ответ на этот вопрос. Он обратил внимание на то обстоятельство, что различные конвенции о геометрии для согласования с физическими экспериментами должны быть дополнены введением универсальных сил и что только одна из геометрий выделена отсутствием таких универсальных сил. К сожалению, однако, фундаментальное значение этого уточнения конвенциональной концепции Пуанкаре не получило должного признания, а в работе А. Грюнбаума эти утверждения Г. Рейхенбаха подверглись даже незаслуженной критике (¹⁹, стр. 101).

Решение же поставленной проблемы, на наш взгляд, состоит в уяснении того, что недостаточность выбранной геометрии пространства-времени вынуждает нас учитывать определенные свойства физической метрики в виде соответствующих всеобщих кинематических эффектов путем внесения универсальных изменений в законы движения. Поэтому условное соглашение определяет только, какая часть свойств физической метрики будет учтена в кинематике, а какая — непосредственно в использованной геометрии пространства-времени. Обе эти формы учета метрических свойств физического мира действительно тождественны по своему фактическому содержанию. В общей теории относительности мы встречаем, например, утверждение, что время в точке *A* идет вдвое медленнее, чем в точке *B*, которое совершенно тождественно утверждению, что все процессы в точке *A* происходят вдвое медленнее процессов в точке *B*.

Следовательно, выделенная отсутствием универсальных сил геометрия наиболее полно отражает известные свойства физической метрики, не требуя дополнительного учета этих свойств в виде всеобщих изменений кинематики процессов. Однако в установлении и объяснении конкретных свойств новой метрики физического пространства и времени предварительный этап описания физических явлений в рамках прежних представлений о времени и пространстве играет первостепенное значение. Этот путь исключает всякую возможность трактовать новую метрику в отрыве от свойств движения физической реальности, позволяет установить конкретные всеобщие свойства физических явлений, предопределяющие отличие новой метрики физического пространства и времени от ранее известной. В этом случае трудности объяснения новых экспериментальных фактов в рамках старой физической теории пространства-времени должны быть преодолены путем открытия новых всеобщих свойств физических процессов, которые затем используются для определения новой метрики пространства и времени. Именно такой путь построения специальной теории относительности был начат Лоренцом. Гениальная догадка о возможности устранения трудностей электродинамики движущихся тел за счет преобразования метрических соотношений позволила Эйнштейну сразу получить окончательное решение проблемы, минуя важную для трактовки теории стадию представления новых общих свойств движения физической реальности в рамках классических представлений о времени и пространстве. Это обстоятельство и послужило причиной появления и распространения ограниченной трактовки теории, в которой не было вскрыто основное содержание преобразований Лоренца, а именно, тот факт, что *взаимосвязь пространственных и временных координат четырехмерной псевдоевклидовой геометрии отражает имеющееся различие скоростей распространения для всей совокупности соответствующих физических процессов в направлении относительного движения инерциальных систем отсчета.*

В 1955 г. в своей творческой биографии⁴¹ Эйнштейн сделал критическое замечание по поводу нелогичности допущенного им при построении теории выделения масштабов и часов из всего остального мира физических

явлений. Добавим, что нелогично также обосновывать свойства этих масштабов и часов на основе рассмотрения только одного процесса распространения света с постоянной скоростью, а затем это постоянство скорости света объяснять теми же свойствами масштабов и часов. В традиционном изложении теории говорится об одинаковости протекания физических процессов в различных инерциальных системах отсчета и в то же время устанавливается факт различия собственных времен и координат в этих системах. Здесь, казалось бы, есть явный отрыв собственных протяженностей и длительностей от метрических характеристик физических процессов в этих системах координат. Как мы видим, это противоречие устраняется выяснением неправомерности утверждения о тождественности соответствующих процессов, которые на самом деле протекают с сохранением кинематического подобия. Конечно, ни сами понятия пространства и времени, ни количественные характеристики протяженности и длительности не представляют собой самостоятельной реальности, существующей наряду с материей или в качестве фактора, определяющего свойства движения материи. Эти понятия служат лишь выражением общих свойств движения материи. Поэтому мы не просто выделяем масштабы и часы из всего многообразия физической реальности, а наделяем их теми свойствами, которые являются общими для всех без исключения физических процессов. Но наиболее наглядно показать это можно, если новые характеристики протяженности и длительности вводить после выяснения соответствующих им общих свойств физических явлений в рамках представлений о времени и пространстве. Сам по себе исходный экспериментальный материал в силу его практической ограниченности никогда не может служить окончательным доказательством всеобщности обнаруженных свойств физических явлений. Он может только подсказать выдвижение предположения о всеобщности обнаруженных свойств и, следовательно, предположение об открытии новых метрических свойств физического пространства и времени. Поэтому наблюдения релятивистских эффектов в таких неизвестных при создании теории относительности явлениях, как распад микрочастиц и ядерные взаимодействия, есть не просто тривиальный результат преобразования длительностей и протяженностей, не имеющий отношения к этим физическим явлениям, а новое доказательство гениальной догадки о всеобщности свойств, обнаруженных раньше при исследовании электродинамики движущихся тел.

Физические представления о времени и пространстве должны обязательно изменяться всякий раз вслед за установлением новых всеобщих свойств взаимодействия и движения материи. Но дальнейшее развитие физического учения о времени и пространстве может пойти только по восходящей линии. Новое физическое учение о пространстве и времени, в какой бы области физики оно ни возникло, должно отражать наряду с новыми и обязательно всеобщими свойствами движения материи также и ранее установленные свойства пространства и времени. Наглядным примером развития физического учения о пространстве и времени может служить релятивистская теория тяготения, которая целиком включает в себя содержание специальной теории относительности.

Исследуя взаимодействия элементарных частиц при больших энергиях, современная физика получает важнейшие данные о фундаментальных свойствах материи и в том числе о свойствах пространства и времени в области ультрамалых размеров. С повышением энергии электронных и протонных ускорителей возникают экспериментальные возможности проникновения внутрь материи, в область все меньших пространственных размеров элементарных частиц. На этом пути физики надеются получить те ценные сведения, которые помогут ликвидировать встретившиеся принци-

пиальные трудности теоретического описания различных фундаментальных взаимодействий элементарных частиц. В частности, большие надежды возлагаются на получение сведений о необходимости пересмотра пространственно-временной метрики в связи с существованием фундаментальной длины и длительности, своеобразных квантов пространства и времени.

По этому поводу следует заметить, что такие изменения метрики в области малых размеров могут возникнуть только на основе всеобщего взаимодействия, которому подвержены все элементарные частицы. Всеобщие, универсальные взаимодействия в силу возможности сведения их к новым свойствам геометрии пространства-времени, на наш взгляд, в отличие от других взаимодействий, не должны осуществляться за счет обмена квантами соответствующих полей *).

Многие физики считают, что для преодоления создавшихся трудностей современной теоретической физики нужно сделать принципиальный шаг, радикально изменяющий наши сегодняшние физические воззрения. Однако следует понимать, что самих по себе новых экспериментальных фактов может оказаться далеко не достаточно, чтобы конкретно решить, какие именно из существующих теоретических представлений должны подвергнуться радикальной перестройке. Для этого требуется также и глубокое понимание самого существа действующего в современной физике теоретического формализма описания физических явлений. Поэтому одной из важнейших задач, стоящих перед физиками нынешнего поколения, является дальнейшее развитие понимания существующих физических теорий, своеобразная модернизация исторически возникших трактовок современных физических представлений, состоящая в приведении их в единую стройную и последовательную систему. Уже на примере специальной теории относительности, кстати, являющейся простейшей среди теорий, составляющих фундамент современных физических воззрений, видна возможность значительного углубления ее понимания за счет выяснения некоторых формально принимаемых положений.

За большую помощь в работе над рукописью статьи автор благодарен Д. А. Флягиной и Ю. И. Иваньшину.

ПРИЛОЖЕНИЯ

А. ВСЕОБЩАЯ УГЛОВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ В ОПИСАНИИ СКОРОСТЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО НЕ ОТЛИЧИМАЯ ОТ СЛУЧАЯ ИЗОТРОПНОГО ОПИСАНИЯ

Пусть выбрано кинематическое описание, в котором для скорости распространения каждого физического процесса введена определенная зависимость от угла θ^* , отсчитываемого от некоторого произвольного направления:

$$u^*(\theta^*) = uf(\theta^*, u),$$

где u — скорость того же физического процесса для случая изотропного описания. Определим допустимый вид зависимости $f(\theta^*, u)$ из условий 1 и 2 (см. стр. 629), обеспечивающих принципиальную невозможность экспериментального обнаружения отличия принятого описания от изотропного.

Согласно условию 1 разность времен распространения физического процесса в прямом и обратном направлениях для некоторого отрезка l^* под углом θ^*

$$\Delta t^* = [l^*/uf(\theta^*, u)] - [l^*/uf(\theta^* + \pi, u)] = 2l^*\beta(\theta^*)$$

*) Квант таких взаимодействий лишь метрическими преобразованиями мог бы быть превращен в бессмысленное, на наш взгляд, понятие — «порцию» пространства и времени. Аналогичная точка зрения была высказана также в докладе Н. П. Конопле-вой и Г. А. Соколика «О геометрии и квантовании»⁵³.

должна оставаться неизменной для всех физических процессов. Следовательно, функция $\beta(\theta^*)$ не должна зависеть от величины скорости u рассматриваемого процесса:

$$\beta(\theta^*) = [f(\theta^* + \pi, u) - f(\theta^*, u)] / [2uf(\theta^*, u)f(\theta^* + \pi, u)] = \text{const}(u). \quad (\text{A},1)$$

Суммарное время распространения того же физического процесса «туда» и «обратно» для отрезка l^* под углом θ^* будет равно

$$t^* = [l^*/uf(\theta^*, u)] + [l^*/uf(\theta^* + \pi, u)] = (2l^*/u)\alpha(\theta^*).$$

Для выполнения условия 2 необходимо, чтобы величина

$$\alpha(\theta^*) = [f(\theta^* + \pi, u) + f(\theta^*, u)] / [2f(\theta^*, u)f(\theta^* + \pi, u)] = \text{const}(u), \quad (\text{A},2)$$

т. е. также не зависела от величины скорости u произвольно выбранного физического процесса.

Совместное выполнение требований (A,1) и (A,2) означает, что функция, описывающая угловую зависимость скорости распространения произвольно выбранного физического процесса, должна следующим образом зависеть от величины u :

$$f(\theta^*, u) = [\alpha(\theta^*) + u\beta(\theta^*)]^{-1},$$

где функции $\alpha(\theta^*)$ и $\beta(\theta^*)$ уже не зависят от u и удовлетворяют следующим условиям: $\alpha(\theta^* + \pi) = \alpha(\theta^*)$ и $\beta(\theta^* + \pi) = \beta(\theta^*)$.

Б. ВЫВОД ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ЛОРЕНЦА

Пусть прямоугольные оси координат в исходной системе K параллельны осям системы K' , движущейся в направлении оси x со скоростью v . Требуется выразить пространственно-временные координаты какого-либо события в системе K' через координаты этого события в исходной системе K .

Будем считать, что искомые преобразования являются линейными функциями

$$\begin{aligned} x' &= \gamma(v)(x - vt), \quad y' = \mu_1(v)y, \quad z' = \mu_2(v)z, \\ t' &= \eta(v)t + \alpha(v)x + \beta_1(v)y + \beta_2(v)z. \end{aligned} \quad (\text{B},1)$$

Линейность функций преобразования координат обосновывается обычно самостоятельным требованием однородности пространства, согласно которому ни одна точка пространства не является выделенной по отношению к другим точкам пространства. Линейность функций преобразования координат можно получить также, если потребовать, чтобы тело, движущееся равномерно и прямолинейно относительно одной системы координат, двигалось бы таким же образом и по отношению к другим движущимся друг относительно друга инерциальным системам координат.

Для определения пространственно-временных преобразований нам необходимо найти коэффициенты $\gamma(v)$, $\mu_1(v)$, $\mu_2(v)$, $\eta(v)$, $\alpha(v)$, $\beta_1(v)$, $\beta_2(v)$. Из того факта, что пространство изотропно и физически выделена только ось x , совпадающая с направлением движения системы K' , следует $\mu_1(v) = \mu_2(v) = \mu(v)$ и $\beta_1(v) = \beta_2(v) = 0$. Для определения коэффициентов γ , μ , η и α рассмотрим некоторый произвольно выбранный физический процесс, распространяющийся в системе K' в направлении оси x' . Скорость этого процесса, определенная с помощью пространственно-временных единиц исходной системы K , согласно соотношению (4) должна быть равна

$$u^* = \frac{dx^*}{dt^*} = \frac{dx}{dt} - v = \frac{dx'}{dt'} \frac{1 - (v^2/c^2)}{1 + (v/c^2)(dx'/dt')}.$$

Отсюда скорость распространения этого процесса относительно исходной системы будет равна

$$\frac{dx}{dt} = \frac{(dx'/dt') + v}{1 + (v/c^2)(dx'/dt')}. \quad (\text{B},2)$$

Выражая в соотношении (B,2) величину dx'/dt' с помощью преобразования (B,1), получим

$$\frac{dx}{dt} = \frac{(\gamma + v\alpha)(dx/dt) + v(\eta - \gamma)}{\eta - (v^2/c^2)\gamma + [\alpha + \gamma(v/c^2)](dx/dt)}.$$

Для того чтобы это равенство выполнялось для различных произвольных значений скорости dx/dt , необходимо потребовать выполнения следующих тождеств: $\eta(v) \equiv \equiv \gamma(v)$ и $\alpha(v)/\eta(v) = -v/c^2$. Таким образом, искомые преобразования могут быть теперь представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned} x' &= \gamma(v)(x - vt), \quad y' = \mu(v)y, \quad z' = \mu(v)z, \\ t' &= \gamma(v)[t - (v/c^2)x]. \end{aligned} \quad (\text{B},3)$$

Совершенно ясно, что если бы система K' двигалась со скоростью v в направлении отрицательных значений координат оси x , то преобразования, ввиду имеющейся симметрии, не должны были бы изменяться. А это означает, что

$$\gamma(v) = \gamma(-v), \quad \mu(v) = \mu(-v). \tag{Б,4}$$

В силу физической равноправности инерциальных систем координат преобразования, связывающие координаты x, y, z и t с координатами системы K' , должны иметь следующую форму:

$$\begin{aligned} x &= \gamma(-v)(x' + vt'), & y &= \mu(-v)y', & z &= \mu(-v)z', \\ t &= \gamma(-v)[t' + (v/c^2)x']. \end{aligned} \tag{Б,5}$$

Разрешая же соотношения (Б,3) относительно переменных x, y, z и t , получим

$$\begin{aligned} x &= \frac{x' + vt'}{\gamma(v)[1 - (v^2/c^2)]}, & y &= \frac{1}{\mu(v)}y', & z &= \frac{1}{\mu(v)}z', \\ t &= \frac{t' + (v/c^2)x'}{\gamma(v)[1 - (v^2/c^2)]}. \end{aligned}$$

Сравнивая эти соотношения с преобразованиями (Б,5) и принимая во внимание равенства (Б,4), найдем

$$\gamma(v) = [1 - (v^2/c^2)]^{-1/2} \quad \text{и} \quad \mu = 1.$$

В результате получаем лоренцовы пространственно-временные преобразования

$$x' = \frac{x - vt}{[1 - (v^2/c^2)]^{1/2}}, \quad y' = y, \quad z' = z \quad \text{и} \quad t' = \frac{t - (v/c^2)x}{[1 - (v^2/c^2)]^{1/2}},$$

связывающие между собой собственные для различных систем отсчета пространственные и временные координаты одного и того же события.

В. ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ВСЕОБЩНОСТИ АНИЗОТРОПИИ В КИНЕМАТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛОРЕНЦА

Пусть имеются две инерциальные системы отсчета K и K' , координаты которых связаны с преобразованиями Лоренца. Рассмотрим движение луча света вдоль оси x в системе отсчета K на некотором отрезке AB , заданном в системе K' . Вычислим временной интервал Δt_{AB} в системе K , соответствующий моментам прохождения светового импульса точек A и B в системе K' :

$$\Delta t_{AB} = t_B - t_A = \frac{\Delta t'_{AB} - (v/c^2)(x'_B - x'_A)}{[1 - (v^2/c^2)]^{1/2}}.$$

Так как временной интервал $\Delta t'_{AB}$ в системе K' равен $\Delta t'_{AB} = \Delta x'_{AB}/c$, где $\Delta x'_{AB} = x'_B - x'_A$ — длина отрезка AB в системе K' , то искомый интервал будет равен

$$\Delta t_{AB} = \frac{\Delta x'_{AB}[1 - (v^2/c^2)]^{1/2}}{c - v} = \frac{\Delta x_{AB}}{c - v}.$$

Теперь рассчитаем временной интервал Δt_{BA} , соответствующий измерениям в той же исходной системе K моментов прохождения световым импульсом точек B и A системы K' в обратном направлении:

$$\Delta t_{BA} = t_A - t_B = \frac{\Delta t'_{BA} - (v/c^2)(x'_B - x'_A)}{[1 - (v^2/c^2)]^{1/2}} = \frac{\Delta x'_{AB}[1 - (v^2/c^2)]^{1/2}}{c + v} = \frac{\Delta x_{AB}}{c + v}.$$

Итак, согласно расчетам на основании преобразований Лоренца измерения в исходной системе K при $v \sim c$ должны обнаружить значительное различие временных интервалов Δt_{AB} и Δt_{BA} , пропорциональное первому порядку величины отношения $\frac{v}{c}$. Это различие в измеренных интервалах в точности соответствует предсказаниям классической физики в рамках гипотезы неувлекаемого эфира о движении светового луча относительно системы K' со скоростью $c - v$ в направлении ее движения и со скоростью $c + v$ в противоположном направлении.

Нам остается выяснить теперь, каким образом это непосредственно наблюдаемое в исходной системе отсчета различие временных интервалов в первом порядке относительно v/c оказывается совместимым с принятым в теории относительности равенством соответствующих временных интервалов $\Delta t'_{AB} = \Delta t'_{BA}$ в системе K' . Для этого рассмотрим ту же самую задачу вычисления временных интервалов в исходной системе для случая распространения в движущейся системе K' произвольного физического процесса с некоторой скоростью $u = \Delta x'_{AB}/\Delta t'_{AB} = \Delta x'_{AB}/\Delta t'_{BA}$. В этом случае на основании преобразований Лоренца получим

$$\Delta \tau_{AB} = \frac{\Delta t'_{AB} + (v/c^2) \Delta x'_{AB}}{[1 - (v^2/c^2)]^{1/2}} = \Delta x'_{AB} \left[1 - \frac{v^2}{c^2} \right]^{1/2} \frac{1 + (vu/c^2)}{u [1 - (v^2/c^2)]} = \frac{\Delta x_{AB}}{u^* (0)}$$

и

$$\Delta \tau_{BA} = \frac{\Delta t'_{AB} - (v/c^2) \Delta x'_{AB}}{[1 - (v^2/c^2)]^{1/2}} = \Delta x'_{AB} \left[1 - \frac{v^2}{c^2} \right]^{1/2} \frac{1 - (vu/c^2)}{u [1 - (v^2/c^2)]} = \frac{\Delta x_{AB}}{u^* (\pi)}$$

Рассмотрим теперь разность и сумму полученных временных интервалов:

$$\Delta \tau_{AB} - \Delta \tau_{BA} = \Delta x_{AB} (v/c^2) [1 - (v^2/c^2)]^{-1},$$

$$\Delta \tau_{AB} + \Delta \tau_{BA} = \Delta x_{AB} u^{-1} [1 - (v^2/c^2)]^{-1}.$$

Из этих соотношений видно, что величина разности временных интервалов не зависит от величины скорости u выбранного процесса и, следовательно, остается постоянной для любых физических процессов, а изменение суммы временных интервалов при выборе различных процессов происходит таким же образом, как и при равенстве скоростей распространения физических процессов в прямом и обратном направлениях.

Следовательно, на основании измерений временных интервалов $\Delta \tau_{AB}$ и $\Delta \tau_{BA}$ для различных физических процессов мы можем убедиться во всеобщности изменений скоростей распространения физических процессов в системе K' , сохраняющих в соответствии с принципом относительности неизменными любые экспериментально наблюдаемые соотношения между различными процессами. За счет учета кинематического подобия в преобразованиях Лоренца совмещается выполнение принципа относительности в системе K' с предсказаниями классической физики (в рамках неувлекаемого эфира) результатов соответствующих наблюдений в исходной системе.

Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. H. Poincaré, Rev. Methaphys. Morales 6, 1 (1898).
2. А. А. Тяшкин, Вопросы философии, № 7, 64 (1970).
3. S. Goldberg, Amer. J. Phys. 35, 934 (1967).
4. А. Эйнштейн, Собрание научных трудов, т. 1, М., «Наука», 1965.
5. В. Паули, Теория относительности, М.—Л., Гостехиздат, 1947.
6. А. С. Эддингтон, Математическая теория относительности, Харьков — Киев, ГНТИ Украины, 1933.
7. Л. И. Мандельштам, Полное собрание трудов, т. 5, М., Изд-во АН СССР, 1950.
8. H. Poincaré, L'Eclairage Électrique 3, 5, 289; 5, 5, 385 (1895); Oeuvres, v. 9, Gauthier-Villard, P., 1954; Rapports du Congrès de Physique de 1900, v. 1, P., 1900, pp. 22—23; An English Translation of the Address Appeared in the Monist 15, 1 (January 1905) (the original in French was published in Bull. des Sci. Math, ser. 2, 28, 302 (1904)).
9. А. Пуанкаре, Наука и гипотеза, М., а) 1903; б) 1904.
10. Курс физики, под ред. акад. Н. Д. Папалекси, т. 2, М.—Л., Гостехиздат, 1947.
11. С. Э. Хайкин, Механика, изд. 2-е, М.—Л., Гостехиздат, 1948.
12. У. И. Франкфурт, а) Очерки по истории специальной теории относительности, М., Изд-во АН СССР, 1961; б) Специальная и общая теория относительности, М., «Наука», 1968, стр. 69.
13. В. А. Фок, Теория пространства, времени и тяготения, М., Гостехиздат, 1955.
14. А. Д. Александров, Вестн. ЛГУ, № 8, 103 (1953); Философская энциклопедия, т. 4, М., «Сов. энциклопедия», 1967, стр. 177; Вопросы философии, № 3, 49 (1971).
15. A. A. R o b b, The Absolute Relations of Time and Space, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1921, pp 12—13.

16. H. Reichenbach, *The Philosophy of Space and Time*, Dover Publications, N.Y., 1958, p. 127.
17. Г. Рейхенбах, *Направление времени*, М., ИЛ, 1962, стр. 62.
18. А. Грюнбаум, *Философские проблемы пространства и времени*, М., «Прогресс», 1969, стр. 44—48, 52, 436—465, 527—553.
19. A. Grünbaum, *Phil. Sci.* 36 (1), 5 (1969).
20. Ю. Б. Молчанов, *Вопросы философии*, № 9, 54 (1964); *Время в классической и релятивистской физике*, М., «Знание», М., 1969.
21. С. И. Вавилов, *Собрание сочинений*, т. 4, М., Изд-во АН СССР, 1956.
22. А. М. Бонч-Бруевич, *ДАН СССР* 109, 481 (1956).
23. В. Черепанов, *Физ.-матем. бюлл.*, вып. 1, Свердловск, НСО Уральск. унта, 1950, стр. 17.
24. Н. Г. Басов и др., *УФН* 75, 3 (1961).
25. Г. М. Страховский, А. В. Успенский, *УФН* 86, 421 (1965).
26. Г. М. Страховский, *Доклад на Ломоносовских чтениях в МГУ*, 1958 (цитируется по²⁴).
27. Дж. Уитроу, *Естественная философия времени*, М., «Прогресс», 1964.
28. А. А. Тяпкин, *Выражение общих свойств физических процессов в релятивистской метрике пространства и времени*. Препринт ОИЯИ Р-766, Дубна, 1961.
29. *Философская энциклопедия*, т. 3, М., «Сов. энциклопедия», 1964, стр. 432.
30. Г. А. Лоренц, *Теория электронов*, М., Гостехиздат, 1956, стр. 275, 298 и 440.
31. *Принцип относительности*. Сборник работ классиков релятивизма (Г. А. Лоренц, А. Пуанкаре, А. Эйнштейн, Г. Минковский). Под редакцией (и с примечаниями) В. К. Фредерикса и Д. Д. Иваненко, М.—Л., ОНТИ, 1935.
32. С. Гольдбергер, *УФН* 102, 261 (1970).
33. И. В. Кузнецов, *сборник «Философские вопросы современной физики»*, М., Изд-во АН СССР, 1952, стр. 48—59; Р. Я. Штейнман, там же, стр. 234.
34. Л. Яноши, *УФН* 62, 149 (1957); *Вопросы философии*, № 8, 101 (1961).
35. М. Борн, *Эйнштейновская теория относительности*, перераб. изд., М., «Мир», 1964.
36. L. Rougière, *La Philosophie Geometrique de Henri Poincaré*, F. Alcan, P., 1920, pp. 200—201.
37. H. Bondi, *Discovery* 18, 505 (1957); М. Борн, *УФН* 69, 105 (1959); Д. В. Скобельцын, *Парадокс близнецов в теории относительности*, М., «Наука», 1966.
38. Ch. Møller, *The Theory of Relativity*, Oxford, Clarendon Press, 1962.
39. Н. С. Лебедева, В. М. Морозов, *сборник «Гравитация и теория относительности»*, вып. 6, Казань, Изд-во КГУ, 1969, стр. 82.
40. А. Д. Александров, *сборник «Философские проблемы современного естествознания»*, М., Изд-во АН СССР, 1959, стр. 116.
41. А. Эйнштейн, *УФН* 59, 71 (1956).
42. V. Vagićak, *Phys. Zs.* 11, 93, 287, 586 (1910); А. П. Котельников, *Принцип относительности и геометрия Лобачевского*, Казань, КГУ, 1926.
43. Н. А. Черников, *Лекции по геометрии Лобачевского и теория относительности*, Новосибирск, Изд. ПГУ, 1965.
44. L. Gomboroff et al., *Amer. J. Phys.* 37, 1040 (1969).
45. А. Пуанкаре, *Ценность науки*, М., «Творческая мысль», 1906.
46. А. Эйнштейн, *Собрание научных трудов*, т. 2, М., «Наука», 1966, стр. 83 и 178.
47. А. С. Эддингтон, *Пространство, время и тяготение*, Одесса, «Матезис», 1923, стр. 10.
48. А. А. Фридман, *Мир как пространство и время*, изд. 2-е, М., «Наука», 1965, стр. 32.
49. W. Thirring, *Ann. Phys.* 16, 69 (1961).
50. В. П. Огневский, И. В. Полубаринов, *ДАН СССР* 166, 585 (1966); *Взаимодействующее поле со спином 2 и уравнения Эйнштейна*. Препринт ОИЯИ Р-2106, Дубна, 1965.
51. M. A. Tonnelat, *Rend. math. e applic.* 24 (3), 401; (4), 507 (1965).
52. А. З. Петров, *ДАН СССР* 190, 305 (1970).
53. Н. П. Коноплева, Г. А. Соколик, *Диалектико-материалистическое истолкование квантовой механики*. Препринт ИТЭФ, Киев, 1972, стр. 233 (*Материалы IV Симпозиума по гносеологическим проблемам измерений*, Ужгород, 1971 г.).
54. *Решение Ученого совета ФИАН*, *УФН* 51, 133 (1953); Ф. А. Королев, *ibid.* 37, 388 (1949); *К обсуждению книги С. Э. Хайкина «Механика» (от редакции)*, *ibid.* 40, 476 (1950); С. Г. Суворов, Р. Я. Штейнман, *ibid.*, p. 407.