



*В помощь изучающим
историю и философию науки*

**СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ:
ОСНОВНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ИДЕИ***

Н.В. Головки, А.Л. Симанов, А.Ю. Сторожук

Прелюдия

Фундаментальные исследования в физике связаны прежде всего с проблемами пространства и времени. Даже в классический период развития физики, когда, казалось бы, господствовало ньютоновское видение пространства как трехмерного бесструктурного вместилища вещей и процессов, исследователи, решая проблему распространения сигналов, пытались “оструктурировать” пространство. Да и “очевидная” трехмерность пространства требовала более глубокого обоснования своей природы, чем просто ссылки на теоретическое описание реальности, вполне удовлетворительное в своем трехмерном варианте. Введение представлений об эфире – один из вариантов такого “оструктурирования”, которое вполне согласовывалось с трехмерностью, однако вызвало значительные трудности в интерпретации ряда физических проблем, так что в итоге пришлось пересмотреть основания самой физики. Такой пересмотр привел к созданию специальной теории относительности (СТО) – новой теории пространства-времени, “изгнавшей” эфир из физики.

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, (проекты № 03–06–80376 и № 03–06–06016), Института “Открытое общество” (Фонд Сороса, Россия, проект НВА 023) и Программы интеграционных проектов СО РАН – 2003 (проект № 125).

В физике понятие эфира получило “гражданство” с развитием оптики, в процессе противоборства корпускулярной и волновой концепций света. Для корпускулярной теории камнем преткновения оказалось открытое в 1665 г. явление дифракции. В свою очередь, волновая теория того времени не могла объяснить прямолинейного распространения света в пустоте.

Известно, что волновой процесс представляет собой распространение колебаний в какой-либо среде. Гук, современник Ньютона, сторонника и одного из авторов корпускулярной теории, предположил, что и свет распространяется в некой среде. Эту идею поддержал Гюйгенс, который и дал такой среде название “эфир”. Свой труд – “Трактат о свете” – он начинает с критики теорий Декарта, Гримальди и Ньютона. Гюйгенс отмечает, что “доказательства, приводимые в этом трактате, отнюдь не обладают той же достоверностью, как *геометрические доказательства* (выделено нами – *Авт.*), и даже весьма сильно от них отличаются, так как в то время, как геометры доказывают свои предложения с помощью достоверных и неоспоримых принципов, в данном случае принципы подтверждаются при помощи получаемых из них выводов. Природа изучаемого вопроса не позволяет, чтобы это происходило иначе” [1]. Он утверждает, что в принципе для высокой степени правдоподобия достаточно того, что “вещи, доказанные с помощью... предполагаемых принципов, совершенно согласуются с явлениями, обнаруживаемыми на опыте, особенно когда таких опытов много и, что еще важнее, главным образом, когда открываются и предвидятся новые явления, вытекающие из применяемых гипотез, и оказывается, что успех опыта в этом отношении соответствует нашему ожиданию” [2].

Этот познавательный принцип и послужил методологической основой, определившей обоснование существования эфира и определение его свойств. Если свет состоит из корпускул, то как он может распространяться прямолинейно, не испытывая отклонений, особенно в телах? И как это может быть, чтобы два пересекающихся пучка лучей, т.е. два потока частиц, не возмущали друг друга путем взаимных соударений? Поскольку свет возникает, например, от огня и пламени – от тел, находящихся в очень быстром движении, этот же свет, сконцентрированный зеркалом, способен сжигать предметы, т.е. разъединять их на части, постольку “нельзя сомневаться в том, что свет состоит в движении какого-то вещества” [3]. Но что это за вещество?

Ответ на этот вопрос Гюйгенс искал, сопоставляя движения звука и света, определяя, в каких отношениях они похожи друг на друга

и в чем они расходятся. Показав таким образом, что веществом, движением которого мог бы быть свет, не может быть воздух, так как свет распространяется и в безвоздушном пространстве, Гюйгенс утверждает, что это должно быть некой эфирной материей – “утонченной материей частиц”. Такие частицы, по его мнению, должны “сколь угодно приближаться к совершенной твердости и сколь угодно быстро восстанавливать свою форму” [4]. Интерес представляет замечание Гюйгенса, что частицы эфира, несмотря на свою малость, могут состоять из еще более мелких частиц и благодаря своей упругости обеспечивать распространению света одну и ту же скорость. Эта материя заполняет всю Вселенную, проникает во все тела, чрезвычайно разрежена, так что она не проявляет свойств тяжести, но очень жесткая и упругая.

Подобную идею выдвигал и Декарт, но Гюйгенс пошел значительно дальше. Он утверждал, что такие свойства вполне обеспечивают механизм распространения света – от частицы к частице через посредство вторичных сферических волн. Это волнообразное движение, вызываемое столь малыми частицами и движениями, способно распространяться на большие расстояния, потому что “бесконечное число волн, исходящих, правда, из различных частичек светящегося тела, на большом расстоянии от него соединяются для нашего ощущения только в одну волну, которая, следовательно, и должна обладать достаточной силой, чтобы быть воспринятой” [5].

Интересен тот факт, что именно это и представляет собой известный принцип построения огибающей волны, вошедший во все учебники физики как принцип Гюйгенса. Он истинен, несмотря на то что основания для его формулировки считаются ложными. Именно с помощью этого принципа Гюйгенс блестяще объяснил частичное отражение, преломление и полное внутреннее отражение, корпускулярный подход к которым вынуждал создавать крайне сложные теории с массой дополнительных гипотез. Объяснение и экспериментальное подтверждение двойного лучепреломления в кварце явилось триумфом теории Гюйгенса. Однако считая колебания эфира продольными, хотя Гук уже выдвигал предположение о поперечности световых волн, Гюйгенс не смог объяснить ряд оптических явлений и отметил: “...По-видимому, нужно принять еще другие предположения сверх сделанных мною, хотя последние и сохраняют все свое правдоподобие, будучи подтвержденными столькими доказательствами” [6].

Дальнейшее свое развитие представления о физическом эфире получили, в частности и прежде всего, в исследованиях Френеля, экспе-

риментально обосновавшего волновой характер света и слившегося воедино три принципа волновой теории: принцип элементарных волн, принцип огибающей и принцип интерференции. В отличие от геометризированной оптики Гюйгенса Френель придал распространению света физический смысл, используя для описания этого процесса понятие импульса элементарной световой волны [7]. Тем самым было окончательно согласовано прямолинейное распространение света с его волновым механизмом.

При изучении поляризации Френель пришел к выводу, что световая волна совершает поперечные колебания [8], и этим самым поставил перед эфирной гипотезой света неразрешимую проблему: из поперечности колебаний следует, что эфир, будучи тончайшим и невесомым, должен в то же время быть и наитвердейшим, ибо только твердые тела передают поперечные колебания. Пытаясь разрешить эту проблему, Френель построил свою модель эфира, согласно которой эфир, заполняя всю Вселенную, пронизывает и все тела, которые вызывают изменение механических свойств и характеристик эфира. Из-за этих изменений при переходе упругой волны возбуждения в эфире из свободного эфира в эфир, содержащийся в веществе, на поверхности раздела часть волны проникает в вещество, а часть – поворачивает обратно. (Этим обосновывалось и явление частичного отражения, долгое время бывшее непонятным физикам.) Скорость распространения волновых колебаний в среде зависит от длины волны, а при заданной длине волны она тем меньше, чем более преломляющей является среда. В результате было закончено построение волновой оптики, объяснившей все известные тогда световые явления на основе гипотезы о светоносном эфире. И хотя главное противоречие в свойствах эфира не было устранено, представления об эфире утвердились в физике до конца XIX в.

Но не только оптические исследования в физике определяли интерес к эфиру. Весь стиль мышления того времени фактически требовал развития представлений о нем. В значительной мере он был обусловлен философскими и методологическими взглядами, оказывающими воздействие на развитие науки. Здесь можно выделить два интересующих нас момента: во-первых, проблема эфира связывалась, как уже отмечалось, с проблемой структуры пространства; во-вторых, идея эфира могла способствовать решению проблем первовещества и структуры Вселенной.

В данном случае существовало два варианта решения. Первый сводился к отождествлению пространства и пустоты, в которой двигаются атомы (корпускулярно-пустотный вариант). Казалось, что успех ньюто-

новской механики, базирующейся в том числе и на идее абсолютного пространства, обосновал истинность такого решения. Отождествление пространства с пустотой казалось очевидным и из самых общих соображений. Действительно, пространство существует везде, в то время как вещественные предметы находятся лишь в отдельных областях пространства, которые отделяют эти предметы друг от друга и позволяют их идентифицировать и дифференцировать. Пространство от материи, таким образом, не зависит, как не зависит отсутствие материи (пустота) от ее наличия. Пространство не зависит и от времени, потому как благодаря отсутствию материальной сущности не имеет качеств, способных изменяться. Само движение возможно только потому, что существует пустое пространство. Ньютон полагал, что он доказал существование такого пространства возникновением центробежных сил при вращательном движении, которое является абсолютным. А абсолютное движение возможно в абсолютном пространстве. Таким образом, пространство предстает перед нами как необходимое условие существования материи, не зависит от последней, является пустым и абсолютным [9]. Это пространство, как и движение в нем, можно с легкостью “геометризировать”, что и было сделано Ньютоном и его последователями. Казалось бы, в таком пространстве и в такой физике эфиру места нет.

Второй вариант связан с интерпретацией пространства в контексте расположения друг относительно друга реальных объектов, что идет еще от Аристотеля. В таком пространстве нет места пустоте, оно объединено с веществом. Наиболее отчетливо это выражено в картезианской философии и физике. Как известно, Декарт сводил бытие к протяженности: “...Природа материи, или тела, рассматриваемого вообще, состоит не в том, что оно – вещь твердая, весома, окрашенная или каким-либо иным образом воздействующая на наши чувства, но лишь в том, что оно – *субстанция*, протяженная в длину, ширину и глубину” [10]. Обосновывая данный тезис, он приходит к выводу, что нечто является телом только тогда, когда оно обладает трехмерной протяженностью. Тем самым тело объективно не отличается от внутреннего места тела, а внешнее место – это поверхность тел, соприкасающихся с данным телом. Но как же быть тогда с разрежением тела? Дается ответ и на этот вопрос: между частицами тела находится не пустота, а другие тела, как вода в губке [11]. Таким образом, “пространство, или внутреннее место, также разнится от тела, заключенного в этом пространстве, лишь в нашем мышлении. И действительно, протяжение в длину, ширину и глубину, образующее пространство, образует и тело. Разница между ними только в том, что телу

мы приписываем определенное протяжение, понимая, что оно вместе с ним изменяет место всякий раз, когда перемещается; пространству же мы приписываем протяжение столь общее и неопределенное, что, удалив из некоторого пространства заполняющее его тело, мы не считаем, что переместили и протяжение этого пространства, которое, на наш взгляд, пребывает неизменным, пока оно имеет ту же величину и фигуру и не изменяет положения по отношению к внешним телам, которые мы определяем это пространство” [12].

Телесность, с точки зрения Декарта, неограниченна в своей протяженности, потому пространство бесконечно. “...Этот мир, или протяженная материя, составляющая универсум, не имеет никаких границ, – утверждал философ, – ибо, даже помыслив, что они где-либо существуют, мы не только можем вообразить за ними беспредельно протяженное пространство, но и постигаем, что они действительно таковы, какими мы их воображаем. Таким образом, они содержат неопределенно протяженное тело, ибо идея того протяжения, которое мы постигаем в любом пространстве, и есть подлинная и надлежащая идея тела” [13]. Кроме того, поскольку не могло быть всеобщей бестелесной пустоты для создания мира, постольку мир, а следовательно, и пространство вечны. Но какова структура пространства? Видимо, она определяется взаимным расположением примыкающих друг к другу материальных тел, не имеющих пор, т.е. тел, мыслимых мельчайшими. Однако это только первый, совершенно очевидный для Декарта вывод. Он идет дальше и глубже: структура пространства определяется еще и движением материальных тел. Действительно, утверждает Декарт, “во всем универсуме существует одна и та же материя и мы познаем ее единственно лишь в силу ее протяженности” [14]. Все свойства, которые воспринимаются в материи, сводятся к ее делимости и подвижности в своих частях. Стало быть, “материя способна принимать различные состояния, которые, как мы видели, могут вытекать из движения ее частей” [15]. Тем самым движение есть не что иное, как действие, посредством которого данное тело переходит с одного места на другое, а в более общем смысле оно “есть перемещение одной части материи, или одного тела, из соседства тех тел, которые с ним соприкасались и которые мы рассматриваем как находящиеся в покое, в соседство других тел” [16]. Если пустоты нет и все частицы примыкают друг к другу, то движение одной из них вызывает движение всех других. В итоге “нигде нет ничего неизменного”, всюду царит вечное изменение. Это приводит к изменению плотности и появлению пластичности материи, т.е. возника-

ют локальные возмущения ее, а следовательно, и протяженности – пространства. Пространство, таким образом, анизотропно и неоднородно.

В физике Декарта взаимодействие тел сводится к соударениям, в результате чего траектории движения искривляются. Каждое соударение не превращает прямолинейное движение в криволинейное, оно лишь меняет одно прямолинейное направление на другое, также прямолинейное. Но большое число соударений всегда дает замкнутую траекторию, образуя тем самым вихрь, так как тело может двигаться в заполненном пространстве только в том случае, когда одно тело уступает место, дорогу другому, то другое – третьему и т.д., пока последнее из захваченных вихрем тел не займет внешнее место первого тела. Возникающие завихрения перемещающихся масс определяют криволинейный характер геометрии движения материальных тел, в частности планет [17]. Эту концепцию вихрей Декарт связывает с представлениями об абсолютной упругости тел и абсолютно упругом ударе. Иначе и быть не могло, – все дело в представлении о форме и размерах тела, его сущности как о свойствах, сохраняющихся при движении и гарантирующих тождественность тела самому себе. Фактически мы имеем здесь физикализацию геометрии (или геометризацию физики?).

Эти идеи Декарта оказались настолько общими и фундаментальными, что последующее развитие физики во многом сохранило их. Для классической физики существование тождественных себе тел остается исходным постулатом. В квантовой механике, в том числе и в релятивистской квантовой механике, существование таких тел является необходимым компонентом теории, без которого квантовые представления о трансмутациях частиц теряют смысл. Известно также и влияние идей Декарта на Эйнштейна, и, как можно легко увидеть, в теории относительности приведенный здесь тезис Декарта получил соответствующую интерпретацию.

Все тела, по Декарту, состоят из мельчайших частиц (“деление необходимо следует из природы материи”), но это не атомы в традиционном их понимании. Существует три рода таких частиц, определяющих структуру мира. Различие этих частиц определяется характером их движения [18]. Частицы первого рода – осколки, отделившиеся от остальной материи и движущиеся с такой скоростью, которой достаточно для их деления на бесконечное число более мелких частиц, приспособленных к точному заполнению мельчайших уголков и промежутков. Вторые – форма всей остальной материи, которая делится на округлые частицы, но и эти частицы могут быть делимы на еще более

мелкие. Третий род частиц – это грубые частицы, имеющие форму, малоприспособленную для свободного движения, каким обладают частицы двух первых родов. Именно из частиц второго рода, по Декарту, и состоит эфир, в котором распространяется свет. Среда, состоящая из таких частиц, подобна жесткому стержню, который смещается под действием движения частиц светящегося тела и воздействует на глаз. Таким образом, мы видим здесь эфирный, но ярко выраженный корпускулярный характер света. В связи с этим отметим, что в эфирной волновой теории света последний является волной, связанной с колебательным движением *частиц* эфира. Не означает ли это, что и волновая теория света имеет в известном смысле корпускулярный характер?

Лейбниц, критикуя картезианство и картезианскую физику с тех же континуалистских позиций, ставил своей целью перестроить картезианскую систему кинетического объяснения процессов на динамическую их интерпретацию. Но сама логика динамического представления механических и математических понятий, которые он использовал, ломала рамки лейбницевской философской и физической схем и с неизбежностью приводила к идее атомизма, противостоящей континуализму.

Исходный пункт лейбницевской критики картезианства – невозможность индивидуализации тела, лишённого других свойств, кроме протяженности. Действительно, если вещь обладает только протяженностью, то в мире не может быть движения [19]. “...Всякое действие тела есть движение” – утверждал философ [20]. Не может быть в этом случае ни разнообразия, ни сцепления частей тела, ни их непроницаемости. В конце концов, сама протяженность тела не имеет смысла, если тело не обладает динамическими свойствами. Тело проявляет свою протяженность благодаря непроницаемости, в то время как, по Декарту, непроницаемость связана с частями самого пространства (что представляет собой физикализацию пространства). Иными словами, по Лейбницу, непроницаемость является выражением динамических непространственных свойств тела. Протяженность же – результат действия непротяженной динамической субстанции, вернее, множества таких субстанций, которые Лейбниц назвал монадами. Эти монады, по его словам, создают само пространство [21]. Поскольку монады в отличие от атомов непротяженны, постольку пространство можно представить как порядок явлений, наблюдаемых в один и тот же момент времени. Тем самым пространство фактически объявляется феноменологической категорией. И поскольку монады относились к метафизическому миру духовных сущностей, постольку они не оказали како-

го-либо влияния на развитие физики, хотя некоторые сторонники концепции монад приписывали им характеристики непротяженных силовых центров.

Однако эта концепция вела к представлению о протяженности атомов и к иерархии дискретных частей материи, что казалось крайне привлекательным, а также к концепции пространства, свободного от материальных тел и в то же время имеющего определенную структуру, обусловленную монадами. Ясно, что здесь много противоречий, но само по себе это было достаточно привлекательным с точки зрения попыток объяснить структуру и природу пространства не некоей пустотой, что вызывало еще большие трудности, но чем-то более конкретным. Тем более, что лейбнизовский вариант вводил в научный оборот представления о специфической форме актуальной бесконечности – такой бесконечности, которая может быть сосчитана, но практически такой пересчет невозможен и не нужен. Появляется принципиально пересчитываемое конечное множество, но рассматриваемое в качестве бесконечно большого, так как пересчитываемые элементы не сравнимы с ним, поскольку их поведение определяется не теми законами, какими определяется поведение множества. Таким образом, осуществляется логический переход к атомистике как иерархии протяженных тел. Но это было реализовано гораздо позже. Пока же монады использовались в физике как некое основание для существования разного рода первичных субстанций, типа электрической жидкости Франклина, в том числе и эфира.

Итак, какие же уроки можно извлечь из этого этапа развития физики и ее философии? Сначала выскажем очевидное и общепризнанное: шла борьба между сторонниками дискретного и континуального представлений, между атомистами и субстанционалистами. Эти подходы стремились объяснить одни и те же явления с разных позиций, но в обоих случаях возникали трудности, для разрешения которых необходимо было привлечение взглядов своих оппонентов. И в представлениях об эфире и распространении света это нашло, пожалуй, наиболее яркое воплощение. Действительно, только корпускулярные представления о свете, распространяющемся либо в пустоте в виде особого рода частиц – световых корпускул, либо в некой среде – эфире (в этом случае свет представлял собой смещение, изменение положения, места частиц эфира), не объясняли такие явления, как, например, интерференция или двойное лучепреломление.

В свою очередь, волновые представления, объясняющие то, что выходило за пределы понимания представлений корпускулярных, требова-

ли обязательного наличия среды, в которой эти колебания распространяются. И здесь примечательно то, что только один вариант объяснения световых явлений предполагал существование пустоты – условно говоря, ньютоновский. Отсюда удивительно, что не были замечены и объединены два варианта – корпускулярный и волновой, связанные с эфиром как средой, в которой распространяется свет. Такое объединение могло бы до определенной степени снять остроту борьбы двух линий. Но было ли такое объединение возможным? Многие скажут, что нет – хотя бы потому, что оно не произошло. Может быть, и так. Однако такое объединение могло бы существенно изменить направление развития физических исследований.

Другой важный урок связан с проблемами пространства, его природы и структуры, а также движения. Пустое пространство при всей своей очевидности большинству исследователей того времени казалось нонсенсом. Его пытались заполнить и оструктурировать, сделать не толькоместилищем, ареной событий, но и агентом, ответственным за физические процессы не только кинематически, но и динамически. Пустое пространство облегчало решение физических задач, но только феноменологическое решение. Процессы фактически описывались, но не объяснялись. Их природа по большей части оставалась в стороне. Любые попытки объяснить явления приводили к субстанциальности пространства и к необходимости введения представлений о разного рода и разной формы материальных агентах.

Кризис

Первые этапы развития электродинамики в ее объяснительном варианте, казалось бы, подтверждали существование некоего материального агента – эфира. Свет, электричество и магнетизм, ранее представлявшиеся совершенно независимыми друг от друга, объединились в одно – электромагнетизм. Максвелл пытался объединить их механическим образом, создав механическую модель электромагнитных явлений. “В различных местах этого трактата, – пишет Максвелл, приступая к изложению электромагнитной теории света, – делалась попытка объяснения электромагнитных явлений при помощи механического действия, передаваемого от одного тела к другому при посредстве среды, занимающей пространство между этими телами. Волновая теория света также допускает существование какой-то среды. Мы должны теперь показать,

что свойства электромагнитной среды идентичны со свойствами светонесущей среды... Мы можем получить численное значение некоторых свойств среды, таких, как скорость, с которой возмущение распространяется через нее, которая может быть вычислена из электромагнитных опытов, а также наблюдается непосредственно в случае света. Если бы было найдено, что скорость распространения электромагнитных возмущений такова же, как и скорость света, не только в воздухе, но и в других прозрачных средах, мы получили бы серьезное основание для того, чтобы считать свет электромагнитным явлением, и тогда сочетание оптической и электрической очевидности даст такое же доказательство реальности среды, какое мы получаем в случае других форм материи на основании совокупности свидетельств наших органов чувств" [22].

На основе анализа своих уравнений Максвелл показал, что поперечные токи смещения распространяются с той же скоростью, причем *конечной*, что и свет, доказав тем самым его электромагнитную природу. Прямое экспериментальное подтверждение этому дал в 1888 г. Г. Герц. Также экспериментально было показано, что скорость света *не зависит* от скорости движения его источника. Но данный факт привел к конфликту с двумя фундаментальными положениями классической механики – классическим правилом сложения скоростей и классическим принципом относительности. Первому положению соответствует преобразование координат при переходе от одной системы отсчета к другой, движущейся относительно первой без ускорения. Обязательным условием при таком преобразовании является сохранение представления об одновременности, согласно которому два события считаются одновременными не только при их регистрации в одной системе отсчета, но и во всякой другой инерциальной системе.

Математически классический принцип относительности выражается преобразованиями Галилея:

$$(x, t) \rightarrow (x', t') : \begin{cases} x' = x - vt, v = \text{const} \\ t' = t. \end{cases}$$

Кроме того, в этом случае пространственное расстояние между двумя точками в одной системе отсчета всегда равно их расстоянию в другой системе. Согласно же классическому принципу относительности нельзя обнаружить равномерное и прямолинейное движение системы отсчета какими-либо внутренними механическими эффектами, находясь в этой системе. Иными словами, во всех инерциальных системах отсчета все

механические явления происходят одинаково. На математическом языке это означает, что уравнения, выражающие законы природы, *инвариантны* по отношению к преобразованиям координат и времени от одной инерциальной системы к другой, т.е. уравнение, описывающее некоторый закон природы, будучи выражено через координаты и время в различных инерциальных системах отсчета, имеет один и тот же вид. Но распространяется ли это положение на электромагнитные явления в общем и на оптические явления в частности? Очевидно, нет, так как если свет распространяется с определенной скоростью относительно любой инерциальной системы отсчета, то при переходе от одной системы к другой, согласно классическому правилу сложения скоростей, скорость света изменит свое значение, что противоречит отмеченному выше эмпирически доказанному факту постоянства и независимости скорости света от скорости движения его источника. Иными словами, величина скорости света не будет инвариантной по отношению к преобразованиям Галилея, что, в свою очередь, говорит о невозможности распространения классического принципа относительности на оптические явления. Таким образом, электродинамика показала несовместимость двух фундаментальных классических принципов – правила сложения скоростей и принципа относительности. Очевидно, что их необходимо было пересматривать.

Одновременно развитие электродинамики, и прежде всего ее эмпирической базы, показало несостоятельность всех классических трактовок эфира как среды, ответственной за передачу электромагнитных излучений. Каждый из оптических экспериментов и наблюдений в движущихся средах при некоторых дополнительных допущениях легко мог быть объяснен в рамках существующих классических представлений, связанных с ньютоновской абсолютностью пространства и времени. Однако интерпретации одних экспериментов и наблюдений противоречили интерпретациям других, так как требовали несовместимых допущений. Наиболее важными оказались результаты трех эмпирических данных: наблюдения аберрации, опыта Физо и опыта Майкельсона.

В 1725 г. Дж. Брэдли обнаружил, что звезда γ Дракона, находящаяся в зените, совершает кажущееся движение с периодом в один год по почти круговой орбите с диаметром, равным 40,5 дуговой секунды. Для звезд, видимых в других местах небесного свода, Брэдли также наблюдал подобное кажущееся движение – в общем случае эллиптическое. Явление, наблюдавшееся Брэдли, называется *абerrацией*. Оно не имеет ничего общего с собственным движением звезды. Причина аберрации

заключается в том, что величина скорости света конечна, а наблюдение ведется с Земли, движущейся по орбите с некоторой скоростью v (рис. 1).

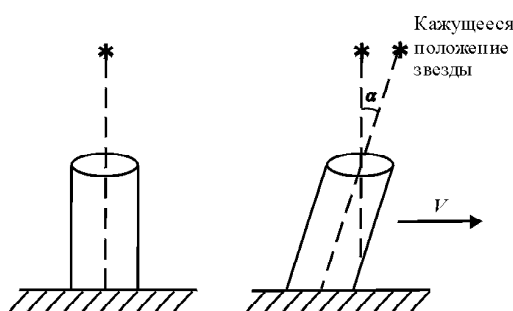


Рис. 1. Абберация света звезды.

Угол раствора конуса, под которым с Земли видна кажущаяся траектория звезды, определяется выражением

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v}{c}.$$

Зная угол α и скорость движения Земли по орбите v , можно определить скорость света c .

В принципе явление абберации легко может быть объяснено как результат классического сложения скоростей, примененного к световым корпускулам, движущимся со скоростью c . Но упрочение господства волновой теории в контексте эфирных представлений изменило понимание этого явления. Для объяснения абберации в рамках волновых представлений Т. Юнг в 1804 г. вынужден был выдвинуть дополнительную гипотезу о том, что при движении Земли эфир ею не увлекается. Однако в 1817 г. О. Френель показал, что если принять, что движущееся тело увлекает за собой не весь содержащийся в нем эфир, а лишь избыточную часть его по сравнению с равным объемом пустого пространства, то явление абберации вполне укладывается в рамки такой интерпретации. Но эта точка зрения была подвергнута Х. Допплером сокрушительной критике. На этой основе Г. Стокс в 1845 г. выдвинул дополнительную гипотезу, противоположную юнговской: эфир полностью увлекается движущимися в нем телами.

Итак, выявилась основная проблема, которая сводилась к ответу на вопрос: неподвижен ли эфир или же он полностью или частично увлекается при движении тел? Ответ на этот вопрос решил бы проблему взаимодействия эфира с веществом, придав первому эмпирически подтвержденный статус либо показав несостоятельность подобных представлений.

Самой простой из гипотез о взаимодействии эфира и вещества была гипотеза полного увлечения эфира. Чтобы проверить это предположение, в 1851 г. И. Физо поставил эксперимент, в основе которого лежали следующие рассуждения. Пусть в неподвижной жидкости свет распространяется со скоростью $c' = c/n$, где n – показатель преломления жидкости. Если жидкость при движении со скоростью v полностью увлекает весь содержащийся в ней эфир, то скорость распространения света в движущейся жидкости должна быть $c' \pm v$.

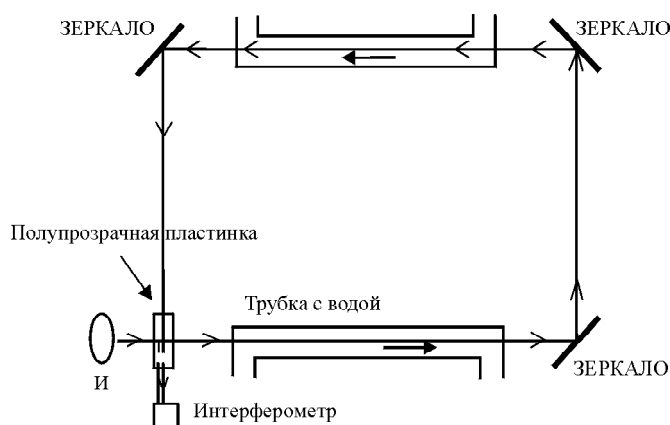


Рис. 2. Установка Физо.

Луч света из источника И (рис. 2) проходит через полупрозрачную пластину, в которой луч частично отражается и попадает в интерферометр, а частично проходит сквозь пластину и пропускается сквозь трубку с текущей водой. Отразившись от зеркал, луч вторично проходит через трубку, в которой течет вода, после чего направляется в интерферометр, где при сложении с первым лучом образует интерференционную картину. По различному положению интерференционных полос можно определить зависимость скорости света в жидкости в зависимости от скорости

ее течения. Физо нашел, что скорость света в направлении движения среды не $c' + v$, а $c' + \alpha v$, где $\alpha = 1 - 1/n^2$ и $0 < \alpha < 1$.

Итак, опыт Физо опроверг гипотезу полного увлечения эфира и показал, что свет только частично увлекается жидкостью. Осталась возможность выбора из гипотез абсолютно неподвижного и частично увлекаемого эфира.

В 1881 г. А. Майкельсон поставил задачу измерить скорость света в двух направлениях – в совпадающем с движением Земли и перпендикулярном ему. Согласно гипотезе об увлечении эфира скорость света в этих взаимноперпендикулярных направлениях должна быть разной. В направлении движения Земли скорость света c в неподвижной системе отсчета должна была суммироваться со скоростью движения Земли v , т.е. составлять $c + v$. В перпендикулярном направлении она должна была остаться равной c . Разность скоростей должна была приводить к разности фаз перпендикулярных лучей монохроматического света. Значит, должна была возникнуть интерференционная картина.

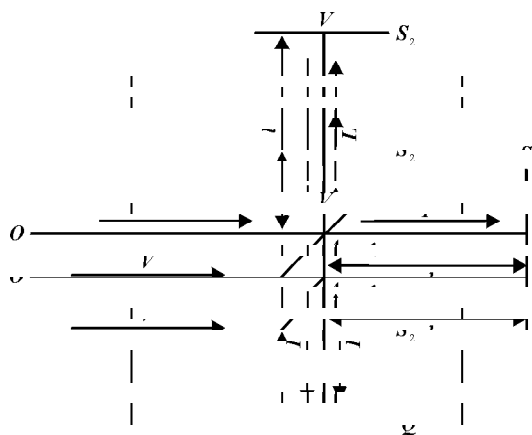


Рис. 3. Интерферометр Майкельсона.

Рассмотрим принципиальную схему прибора для обнаружения интерференции, который называется *интерферометр Майкельсона* (рис. 3). Вектор V указывает направление движения Земли. Из точечного источника монохроматического света O посылается луч света, падающий на полупрозрачное зеркало L , установленное под углом 45° к направлению

светового луча. Часть света I проходит сквозь полупрозрачное зеркало L и направляется на зеркало S_1 , а вторая часть света II отражается полупрозрачным зеркалом L и попадает в зеркало S_2 . Расстояния от центральной точки A полупрозрачного зеркала L до зеркал S_1 и S_2 называются *плечами интерферометра*. Эти плечи равны, т.е. оба пучка света проходят одинаковые расстояния. Отраженные от зеркал S_1 и S_2 пучки света I и II достигают полупрозрачного зеркала L , где луч I отражается, а луч II проходит сквозь него. Оба луча попадают на экран Q , где и должна была наблюдаться интерференционная картина.

На участках OA и AQ оба луча движутся совместно и никакой разности хода у них возникать не должно. Но на плечах интерферометра l_1 и l_2 условия их движения неодинаковы. Пусть l_1 луч проходит дважды: в направлении, совпадающем с движением Земли, т.е. со скоростью $c + v$, и в противоположном направлении, т.е. со скоростью $c - v$. Время, необходимое лучу для того, чтобы дважды пройти путь l_1 , следовательно, будет определяться выражением

$$\Delta t_1 = \frac{l_1}{c - v} + \frac{l_1}{c + v} = \frac{2l_1 c}{c^2 - v^2}.$$

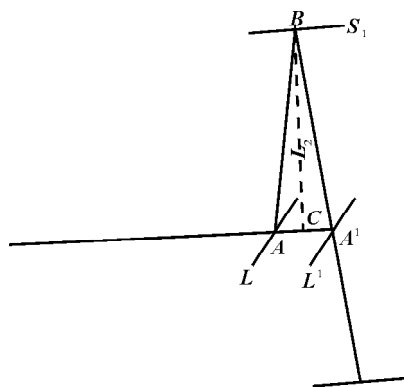


Рис. 4. Путь света в опыте Майкельсона.

Теперь найдем время Δt_2 , необходимое для того, чтобы II луч прошел путь от A до B и обратно. По этому пути луч туда и обратно движет-

ся с одной и той же скоростью c , но так как за время Δt_2 его движения от A до B и обратно зеркало S_2 сместится вместе с Землей на расстояние $AA' = v \Delta t_2$ (рис. 4), то и луч будет проходить расстояние не $2l_2$, а несколько большее. Это расстояние нетрудно найти и из него определить Δt_2 .

Путь, проходимый лучом, составляет $AB + BA' = 2AB$. Из треугольника ABC имеем

$$AB^2 = BC^2 + AC^2,$$

но $BC = l_2$, $AC = v\Delta t_2/2$, $AB = c\Delta t_2/2$.

По теореме Пифагора

$$c^2 \Delta t_2^2 - v^2 \Delta t_2^2 = 4l_2^2.$$

Отсюда

$$\Delta t_2 = \sqrt{\frac{4l_2^2}{c^2 - v^2}}.$$

Итак, из гипотезы абсолютно неподвижного эфира следует, что $\Delta t_1 \neq \Delta t_2$, свет затрачивает разное время для прохождения плеч интерферометра. За счет этого при соединении лучей I и II в A между ними должна возникать разность фаз, дающая смещение интерференционных полос на экране Q .

Однако опыт Майкельсона дал отрицательный результат, т.е. никакого размывания интерференционной картины лучей I и II не возникало. Опыт показывал, что, следовательно, $\Delta t_1 = \Delta t_2$. Отсюда был сделан вывод, что эфир полностью увлекается движущейся Землей, а это, в свою очередь, противоречит результатам опыта Физо. Данное обстоятельство требовало объяснения, и одной из попыток такого объяснения явилась гипотеза Лоренца – Фицджеральда. Авторы ее предложили считать, что все предшествующие рассуждения правильны, что действительно должна была бы возникать разность времен прохождения лучами I и II плеч интерферометра l_1 и l_2 (а следовательно, и разность фаз в этих лучах). Но этого не происходит потому, что все тела в направлении своего движения

испытывают сокращение, уменьшаясь в $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ раз. Иными словами, отрицательный результат опыта Майкельсона истолковывался таким образом, что l_1 и l_2 только кажутся равными друг другу, а на самом деле плечо

l_1 оказывается сократившимся, тогда как l_2 остается неизменным. Причем l_1 сокращается именно так, чтобы не возникало никакой разности во времени прохождения. Этому равенству можно удовлетворить в том и только в том случае, если положить, что

$$l_1 = l_2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

т.е. плечо l_1 , расположенное по направлению движения Земли, сокращается в $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ раз по сравнению с плечом l_2 , остающимся неизменным.

Но это сокращение, получившее название сокращения Лоренца, по самой его сути невозможно обнаружить, так как любой масштаб, которым мы будем мерить плечо l_1 , испытывает одновременно с ним сокращение точно во столько же раз, во сколько сокращается и само плечо l_1 .

Пусть сначала l_1 располагалось перпендикулярно к движению Земли и, следовательно, не испытывало никакого сокращения. Пусть масштабная линейка, приложенная к l_1 , показывала 20 делений. Ставим

плечо l_1 по направлению движения Земли; оно изменилось в $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ раз, но приложенная к нему масштабная линейка показывает по-прежнему 20 делений, поскольку и каждое из этих делений сократилось в такое же число раз.

Таким образом, сокращение Лоренца мыслилось имеющим место и в то же время принципиально необнаруживаемым ни в одном явлении, кроме отсутствия размывания интерференционной картины световых лучей, для объяснения которого оно и было специально придумано. Это яркий пример принципиально непроверяемой гипотезы, так как она не ведет ни к каким наблюдаемым результатам, кроме тех, для объяснения которых она специально и придумывается. Такие гипотезы называются гипотезами ad hoc (“для данного случая”) и в отличие от истинных гипотез, дающих систематическое решение широкого круга проблем, предлагают решение одной проблемы и часто входят в противоречие с рядом уже хорошо известных и апробированных результатов.

В контексте сохранения идеи эфира Лоренц рассмотрел также вопрос о том, достаточно ли принять гипотезу сокращения, для того чтобы вывести принцип относительности. Полученный им результат столь же

поразителен, как и гипотеза сокращения: в инерциальной системе необходима новая мера времени. Лоренц назвал это время, изменяющееся при переходе от одной инерциальной системы к другой, *локальным временем*. Обе гипотезы совместно требуют, чтобы пространство и время в движущихся системах и в покоящемся эфире измерялись различным образом. В этой новой теории Лоренца [23] принцип относительности справедлив для всех электромагнитных явлений в любой системе отсчета независимо от того, покоится ли она в эфире или движется в нем равномерно и прямолинейно, т.е. не существует физически выделенной абсолютной системы отсчета. Но таким образом, никакое конкретное положение в эфире не имеет физического смысла и тем самым эфир теряет свойства реальной субстанции. Действительно, если любой из наблюдателей, движущихся относительно друг друга, может с равным правом утверждать, что именно он покоится в эфире, то какой физический смысл имеет такой принципиально ненаблюдаемый эфир?

Итак, развитие идеи эфира, который должен был служить переносчиком электромагнитных взаимодействий, привело не просто к системе эмпирических и теоретических противоречий, но и к отрицанию самой этой идеи. Остается задача – построить новую теорию, опирающуюся на существующую эмпирическую базу, но без привлечения идеи эфира.

Выход из кризиса: специальная теория относительности

Свою работу “К электродинамике движущихся сред” (1905 г.), положившую начало специальной теории относительности, А.Эйнштейн начинает с фиксации асимметричности электродинамического взаимодействия. «Известно, что электродинамика Максвелла, – пишет он, – в современном ее виде приводит в применении к движущимся телам к асимметрии, которая несвойственна, по-видимому, самим явлениям. Вспомним, например, электродинамическое взаимодействие между магнитом и проводником с током. Наблюдаемое явление зависит здесь только от относительного движения проводника и магнита, в то время как, согласно обычному представлению, два случая, в которых движется либо одно, либо другое из этих тел, должны быть строго разграничены... Примеры подобного рода, как и неудавшиеся попытки обнаружить движение Земли относительно “светоносной среды”, ведут к предположению, что не только в механике, но и в электродинамике

никакие свойства явлений не соответствуют понятию абсолютного покоя и даже, более того, – к предположению, что для всех координатных систем, для которых справедливы уравнения механики, справедливы те же самые электродинамические и оптические законы...» [24]. Это предположение Эйнштейн далее превращает в предпосылку новой теории, которую он называет принципом относительности, и вводит, по его словам, «добавочное допущение, находящееся с первым лишь в кажущемся противоречии, а именно, что свет в пустоте всегда распространяется с определенной скоростью V , не зависящей от состояния движения излучающего тела... Введение “светоносного эфира” окажется при этом излишним, поскольку в предлагаемой теории не вводится “абсолютно покоящееся пространство”, наделенное особыми свойствами, а также ни одной точке пустого пространства, в котором протекают электромагнитные процессы, не приписывается какой-нибудь вектор скорости» [25].

Тем самым Эйнштейн отказывается от классических представлений об абсолютности пространства и времени, принципа относительности Галилея и приходит к необходимости пересмотра классических кинематических представлений, который предполагает признание эмпирически подтвержденного еще Герцем факта конечности скорости света и, как следствие, ее независимости от скорости движения источника. Пересмотр начинается с основывающегося на этих фактах переопределения понятия одновременности.

Первоначально Эйнштейн формулирует принципы синхронизации часов, так как для описания движения какой-либо материальной точки мы задаем значения ее координат как функций времени, при этом “все наши суждения, в которых время играет какую-либо роль, всегда являются суждениями об *одновременных событиях*” [26]. Отметим при этом, что синхронизация проводится с помощью луча света, т.е. фактически предполагается изотропность и однородность пространства, обеспечивающие одинаковость скорости распространения света во все стороны.

Мы можем говорить, что два события происходят в один и тот же момент времени, если имеем в различных точках пространства синхронизированные часы. Пусть в точках A и B есть часы. Фиксируем, что время прохождения света из A в B равно времени прохождения света из B в A . Пусть в момент времени t_A из A посылается световой сигнал, который достигает точки B в момент времени t_B , отражается и достигает точки A в момент времени t_A^0 . Часы по определению идут в точках A и B синхронно, если

$$t_B - t_A = t_A^0 - t_B^0.$$

Таким образом устанавливается, что время события – это одновременное с событием показание покоящихся часов, находящихся в месте события. Это время, принадлежащее к покоящейся системе, Эйнштейн называет “временем покоящейся системы” [27].

Рассмотрим теперь две инерциальные системы координат K и K' с осями координат XYZ и $X'Y'Z'$, причем система K' движется относительно системы K вправо вдоль осей X и X' (рис. 5). Пусть из некоторой точки A на оси X' одновременно отправляются сигналы в двух взаимно противоположных направлениях. Поскольку скорость распространения сигнала в системе K' , как и во всякой инерциальной системе, равна (в обоих направлениях) c , сигналы достигнут равноудаленных от A точек B и C в один и тот же момент времени (в системе K').

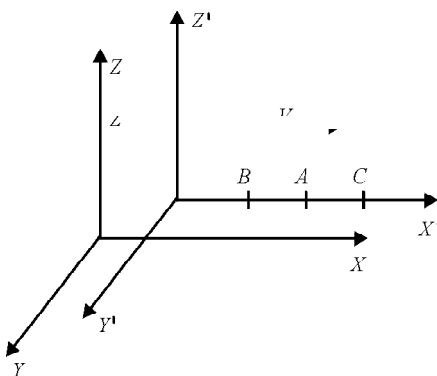


Рис. 5. Относительность понятия одновременности

Легко, однако, убедиться в том, что эти два события (приход сигналов в B и C) будут не одновременными для наблюдателя в системе K . Для него тоже скорость света равна c в обоих направлениях, но точка B движется навстречу свету, так что ее свет достигнет раньше, а точка C удаляется от света и поэтому сигнал придет в нее позже.

Таким образом, принцип относительности в формулировке Эйнштейна вносит фундаментальные изменения в основные физические понятия. Основанные на повседневном опыте, наши представления о пространстве и времени оказываются лишь приближенными, связанными

с тем, что в обыденной жизни мы имеем дело только со скоростями, очень малыми по сравнению со скоростью света.

Дальнейшие соображения Эйнштейна опираются на установленное им понимание одновременности и на сформулированные уже явным образом два принципа – принцип относительности и принцип постоянства скорости света: «1. Законы, по которым изменяются состояния физических систем, не зависят от того, к которой из двух координатных систем, движущихся относительно друг друга равномерно и прямолинейно, эти изменения состояния относятся. 2. Каждый луч света движется в “покоящейся” системе координат с определенной скоростью V , независимо от того, испускается ли этот луч света покоящимся или движущимся телом» [28]. Эти результаты позволяют рассмотреть относительность длин и времен.

Вопрос о длине движущегося стержня Эйнштейн решает с помощью двух операций: 1) наблюдатель, *движущийся вместе с масштабом и стержнем*, измеряет длину стержня непосредственно, путем прикладывания к нему масштаба так, как если бы наблюдатель, масштаб и стержень находились в покое; 2) наблюдатель устанавливает, в каких точках покоящейся системы находятся начало и конец измеряемого стержня в определенный момент времени t посредством установленных в покоящейся системе синхронизированных в указанном выше смысле покоящихся часов. Расстояние между этими двумя точками, измеренное в данном случае покоящимся масштабом, есть длина, которая обозначается как “длина стержня” [29]. Согласно принципу относительности длина, определяемая операцией (1) и называемая Эйнштейном “длиной стержня в движущейся системе”, равняется длине покоящегося стержня. В случае операции (2) длина, которая определяется им как “длина (движущегося) стержня в покоящейся системе”, отличается от длины стержня в первом случае [30]. Максимальную длину стержень имеет в той системе отсчета, в которой он покоится, но всегда кажется укороченным, если длину его измерять в другой системе, движущейся относительно первой. Сокращаются при этом те размеры стержня, которые параллельны направлению движения системы отсчета.

Согласно Эйнштейну, относительность времен определяется следующим образом. Представим себе, что часы помещены на обоих концах стержня A и B , т.е. жестко связаны между собой. Стержень покоится в системе K' , движущейся в направлении стержня AB с постоянной скоростью относительно системы K . В этой системе стержень движется со скоростью v . С точки зрения наблюдателя, связанного с неподвижной

системой отсчета, относительная скорость стержня и света будет равна $c - v$ на пути из A в B и $c + v$ – при обратном переходе. По часам, покоящимся в системе K ,

$$t_B - t_A = \frac{r}{c - v}, \quad t'_A - t'_B = \frac{r}{c + v},$$

где r – расстояние AB , измеренное в системе K . Наблюдатель в системе K' , движущейся вместе со стержнем, фиксирует, что свет движется из A в B и назад со скоростью c , и, устанавливая синхронность часов B и A , он требует выполнения условия

$$t_B - t_A = t'_A - t'_B.$$

Таким образом, можно видеть, что часы, синхронные в неподвижной системе отсчета, несинхронны в движущейся системе, и наоборот. Понятие одновременности носит относительный характер, связанный с системой отсчета [31].

Полученные результаты позволяют (опять же с использованием двух известных нам принципов, или постулатов) найти формулы преобразования от одной инерциальной системы отсчета к другой, т.е. формулы, по которым, зная координаты x, y, z, t события в некоторой системе отсчета K , можно найти координаты x', y', z', t' того же события в другой инерциальной системе K' . При этом вторая система движется относительно первой в направлении x со скоростью v . В момент $t = t' = 0$ системы совмещены. В этот момент из общего начала координат испускается луч света.

Условие однородности пространства и времени означает, что связь между обеими системами отсчета должна быть линейной. Кроме того, из условия движения вдоль оси x ясно, что $y = y', z = z'$. Ясно также, что $x = ct$, а $x' = ct'$. Учитывая, что преобразования Галилея необходимо скорректировать в соответствии постулатами СТО, можно записать, что

$$x = k(x' + vt'),$$

$$x' = k(x - vt).$$

где k пока не определено. Подставляя соответствующие выражения, получим

$$x = k(x' + \frac{v}{c}x') = kx'(1 + \frac{v}{c}),$$

$$x' = k(x - \frac{v}{c}x) = kx(1 - \frac{v}{c}).$$

Перемножим эти выражения:

$$xx' = k^2 x' x (1 - \frac{v^2}{c^2}).$$

Отсюда видно, что

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Тогда

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

а для времен t и t' получаем выражения

$$t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

а закон сложения скоростей примет вид

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}.$$

Из этого соотношения следует, что при сложении двух скоростей, меньших c , всегда получается скорость, меньшая c .

Используя приведенное правило сложения скоростей и закон сохранения импульса, легко показать, что в релятивистской механике масса движущегося тела m определяется выражением

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где m_0 – масса покоящегося тела. Ясно, что изменение массы можно экспериментально обнаружить лишь при больших скоростях, близких к скорости света, что и было доказано во множестве экспериментов с электронами (в частности, опыты В.Кауфмана в 1902 и 1906 гг.).

В 1905 г. Эйнштейн вывел также знаменитое соотношение между энергией тела E и его массой покоя $E = m_0 c^2$, также получившее экспериментальное подтверждение.

Современную тензорную форму специальной теории относительности придал к 1908 г. Г.Минковский. Он исходил из того, что предметом человеческого восприятия всегда являются пространственные и временные интервалы, взятые в совокупности. Действительно, мы воспринимаем пространственное положение объекта в определенный момент времени, а фиксируем время в определенном месте. Отсюда Минковский предложил рассматривать понятие события, определяемого местом, где оно произошло, и временем, когда оно произошло, что фиксируется координатами x, y, z, t . Эту систему значений координат он назвал мировой точкой. Кривая, изображающая путь мировой точки, рассматривается как мировая линия. Точки этой линии определяют координаты частицы во все моменты времени. Если частица покоится или движется равномерно и прямолинейно, то ей соответствует прямая мировая линия.

Рассмотрим две инерциальные системы отсчета K и K' , движущиеся друг относительно друга с постоянной скоростью. Координатные оси выберем так, чтобы оси x и x' совпадали, а оси y и z были бы параллельны осям y' и z' . Время в системах K и K' обозначим через t и t' .

Пусть первое событие состоит в том, что из точки с координатами x_1, y_1, z_1 в момент времени t_1 (в системе отсчета K) отправляется сигнал, распространяющийся со скоростью света. Будем наблюдать из системы отсчета K за распространением этого сигнала. Пусть второе событие состоит в том, что этот сигнал приходит в точку x_2, y_2, z_2 в момент времени t_2 . Поскольку сигнал распространяется со скоростью света c , пройденное им расстояние равно $c(t_2 - t_1)$. С другой стороны, это же расстояние равно $\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$. В результате оказывается справедливым следующее соотношение между координатами обоих событий в системе K

$$(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - c^2(t_2 - t_1)^2 = 0.$$

Те же два события, т.е. распространение светового сигнала, можно наблюдать из системы K' . Пусть координаты первого события в системе K' : x_1', y_1', z_1', t_1' , а второго: x_2', y_2', z_2', t_2' . Поскольку скорость света в системах K и K' одинакова, то аналогично предыдущему выражению имеем

$$(x_2' - x_1')^2 + (y_2' - y_1')^2 + (z_2' - z_1')^2 - c^2(t_2' - t_1')^2 = 0.$$

Если x_1, y_1, z_1, t_1 и x_2, y_2, z_2, t_2 — координаты каких-либо двух событий, то величина

$$s_{12} = \sqrt{c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2}$$

называется *интервалом* между этими двумя событиями.

Если два события бесконечно близки друг другу, то для интервала ds между ними имеем

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2.$$

Форма двух последних выражений позволяет рассматривать интервал, с формальной математической точки зрения, как “расстояние” между двумя точками в воображаемом четырехмерном пространстве (на осях которого откладываются значения x, y, z и произведение ct). Имеется, однако, существенное отличие в правиле составления этой величины по сравнению с правилами обычной евклидовой геометрии: при образовании квадрата интервала квадрат разности координат по временной оси входит со знаком плюс, а квадраты разностей пространственных координат — со знаком минус. Такую четырехмерную геометрию называют *псевдоевклидовой* в отличие от обычной, евклидовой, геометрии.

Легко можно увидеть, что $ds^2 = ds'^2$. Это означает, что пространственно-временной интервал инвариантен относительно преобразования координат. Свойство инвариантности интервала имеет большое значение, так как оно показывает, что скорость света c — одна и та же в обеих системах координат. Если же мы будем рассматривать только пространственный интервал, то увидим, что его величина меняется при переходе от одной системы координат к другой в соответствии с преобразованиями Лоренца, т.е. пространственный интервал — величина

неинвариантная, что еще раз подтверждает необходимость совместного рассмотрения пространства и времени. “То обстоятельство, – писал Эйнштейн, – что нет объективного расщепления четырехмерного континуума на трехмерно-пространственный и одномерно-временной континуумы, имеет своим следствием, что законы природы получают свою логически удовлетворительнейшую форму лишь в том случае, когда их выражают как законы четырехмерного пространственно-временного континуума. В этом заключается сущность того значительного методического успеха, которым теория относительности обязана Минковскому” [32].

Итак, основные идеи специальной теории относительности как физической теории пространства и времени можно сформулировать в виде следующих утверждений. *Пространственные и временные координаты образуют единое четырёхмерное многообразие с псевдоевклидовой геометрией. Физические законы одинаковы во всех инерциальных системах, то есть в системах, движущихся с постоянными скоростями относительно друг друга. Длины и времена, измеряемые в какой-либо подобной системе, кажутся иными из другой системы, но результаты измерений связаны между собой преобразованиями Лоренца.*

Но специальная теория относительности не решает всех проблем, связанных с описанием пространства, времени и движения. Так, в практике мы встречаем множество движений с ускорением. Таковы, например, все вращательные движения, а также движения под действием гравитации. Значит ли это, что в подобных системах происходит изменение форм законов при переходе от инерциальных систем к неинерциальным? Или можно обобщить принцип относительности на все системы отсчета? И можно ли геометризировать такую физику, т.е. выявить соответствующее ей пространство? На все эти вопросы, как и на многие другие, отвечает общая теория относительности.

Примечания

1. Гюйгенс Х. Трактат о свете, в котором объяснены причины того, что с ним происходит при отражении и при преломлении, в частности при странном преломлении исландского кристалла // Голин Г.М., Филонович С.З. Классики физической науки (с древнейших времен до начала XX в.): Справ. пособие. – М.: Высш. шк., 1989. – С. 131.
2. Там же. – С. 131, 132.
3. Там же. – С. 132.
4. Там же. – С. 133.
5. Там же. – С. 135.

6. Там же.
7. См.: *Френель О.* Избранные труды по оптике. – М.: Гостехиздат, 1955.
8. Там же. – С. 630.
9. См.: *Мостепаненко А.М.* Проблема универсальности основных свойств пространства и времени. – Л.: Наука, 1969. – С. 38, 39.
10. *Декарт Р.* Сочинения: В 2 т. – М.: Мысль, 1989. – Т. 1. – С. 350.
11. См.: Там же. – С. 351.
12. См.: Там же. – С. 353.
13. Там же. – С. 359.
14. Там же.
15. Там же. – С. 360.
16. Там же.
17. Там же. – С. 360–366.
18. См.: Там же. – С. 396–398.
19. См.: *Лейбниц Г.-В.* Сочинения: В 4 т. – М.: Мысль, 1982. – Т. 1 – С. 80–102.
20. Там же. – С. 84.
21. Там же. – С. 421.
22. *Максвелл Дж.К.* Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. – М.: Гостехиздат, 1954. – С. 550, 551.
23. См.: *Лоренц Г.А.* Теория электронов и ее применение к явлениям света и теплового излучения. – М., 1956.
24. *Эйнштейн А.* Собрание научных трудов: В 4 т. – М.: Наука, 1965. – Т. I. – С. 7.
25. Там же. – С. 7, 8.
26. Там же. – С. 8.
27. Там же. – С. 10.
28. Там же.
29. Там же. – С. 12.
30. Там же.
31. Там же. – С. 12, 13.
32. Цит. по: *Франкфурт У.И.* Специальная и общая теория относительности. – М.: Наука, 1968. – С. 79.

Институт философии и права
СО РАН, г. Новосибирск