



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

А.А. Тяпкин

766

ВЫРАЖЕНИЕ ОБЩИХ СВОЙСТВ
ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В РЕЛЯТИВИСТСКОЙ МЕТРИКЕ
ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

Дубна 1961 год

А.А. Тяпкин

766

ВЫРАЖЕНИЕ ОБЩИХ СВОЙСТВ
ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В РЕЛЯТИВИСТСКОЙ МЕТРИКЕ
ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ

После установления замкнутой системы математических уравнений и соотношений, выражающих характерные для данной теории связи между различными физическими величинами, физическая теория получает права самостоятельного существования, хотя ряд очень важных вопросов, касающихся понимания новых закономерностей, остается невыясненным. Многие физики, видимо, из-за огромного успеха применения новой теории на практике забывают, что для полного завершения физической теории необходим еще большой и кропотливый труд по созданию физической интерпретации (трактовки) теории, призванной ответить на такие, например, важные для дальнейшего развития физики вопросы: какие из старых физических представлений используются в новой теории, каковы неучитываемые прежними теориями основные начала, лежащие в основе специфических особенностей новых закономерностей и каковы границы области применения новой теории? Правильный ответ на первые из этих вопросов может быть дан на основе построения и изложения теории, тесно связанных с представлениями предшествующей физической теории и как бы перебрасывающих мост между обеими теориями. Ответ же на последний вопрос и вместе с ним завершение трактовки теории становится возможным лишь после создания новой, еще более общей и полной физической теории.

Для одной и той же теории могут быть сделаны различные в математическом и физическом отношении построения. Теория может допускать изложение как бы в различных представлениях, быть изображенной с различных исходных позиций. Отыскание этих возможных и независимых построений имеет огромное значение для понимания сущности теории, позволяет отбросить элементы, относящиеся не к существу теории, а к ее конкретной форме построения и изложения. Только по недоразумению эта работа может не считаться важнейшей частью физического исследования. Совершенно очевидно также, что без такого рода исследований возможных трактовок физической теории нельзя правильно и достаточно глубоко выяснить философское содержание теории.

Известный американский физик-теоретик Р.Фейнман, предлагая новую формулировку квантовой механики, писал: "...доставляет удовольствие рассматривать старые вещи с новой точки зрения. Кроме того, есть вопросы, при рассмотрении которых новый подход представляет заметные преимущества ... Всегда

есть надежда, что новая точка зрения подскажет нам, как именно следует видоизменить существующую теорию (необходимость чего диктуется современным экспериментом)" x).

Традиционное построение специальной теории относительности начинается с формального вывода релятивистских преобразований пространственно-временных координат на основе исходных постулатов теории: принципа относительности и принципа независимости скорости света от движения источника. При таком подходе, к сожалению, остаются невыясненными общие свойства физических процессов, определяющие особенности релятивистской метрики пространства и времени. Приводимые же обычно рассуждения об особенностях процедуры пространственно-временных измерений не ликвидируют этот пробел, так как они годятся в лучшем случае лишь для иллюстрации, а не для обоснования релятивистских свойств пространства и времени. Факт монополюсного существования данной трактовки теории привел к возникновению затянувшихся споров по поводу философского и физического содержания теории, преподавание которой давно следовало бы начинать уже в средней школе.

В настоящей работе указывается на возможность другого пути построения специальной теории относительности: в рамках старых галилеевских представлений о пространстве и времени находятся те общие изменения в ходе физических процессов, существование которых необходимо допустить, принимая исходные постулаты теории относительности. Затем показывается, что найденные общие свойства происходящих в мире физических процессов с неизбежностью приводят к лоренцовским преобразованиям пространственно-временных координат. При таком подходе четко выявляется и философское содержание теории относительности, как теории, в которой свойства движущейся материи определяют особенности пространственно-временных соотношений.

x
x x

Пространство и время являются объективными формами существования материи. Физические свойства пространства и времени могут определяться только всеобщими свойствами материи. При этом под всеобщими свойствами материи

x) Р.Фейнман. Сборник переводов "Вопросы причинности в квантовой механике", стр. 168, изд. ИЛ 1955г.

следует подразумевать свойства, относящиеся ко всем без исключения материальным объектам, ко всем физическим процессам. Поэтому материалистическая сущность произведенных теорией относительности изменений в представлении о физических свойствах пространства и времени может быть заключена только в установлении соответствующих всеобщих свойств движения материи. Важно отметить, что эти изменения в прежних классических представлениях о движении материи относятся не к какому-то одному выделенному процессу, например, распространению света, а ко всем без исключения физическим процессам, т.е. относятся к движению материи в полном смысле этого слова.

Для того, чтобы уяснить себе какие следствия количественного характера, касающиеся в первую очередь времени, должны вытекать из этих общих положений о связи пространственно-временной метрики с движением материи, обратимся к простому примеру. Пусть имеются две отдельных области пространства А и Б. Различные физические процессы, происходящие в этих областях, находятся в определенных кинематических отношениях друг к другу. Пусть далее известно, что соотношения между физическими величинами, характеризующими процессы в области Б, остаются точно такими же, как и соотношения между физическими величинами, относящимися к аналогичным процессам в области А. Спрашивается, какой смысл в этом случае должен вкладываться в утверждение, что количество времени, прошедшего с некоторого момента в области Б, превышает в n раз количество времени, прошедшего с того же момента в области А? Это утверждение может иметь только один смысл: все процессы в области Б происходят в n раз быстрее соответствующих (аналогичных) процессов, происходящих в области А. Ясно, что никакими исследованиями только процессов, происходящих в области Б, невозможно обнаружить этого всеобщего изменения скоростей движения во всех процессах. В то же время это объективно существующее различие в темпе процессов должно непосредственно обнаруживаться при сопоставлении любой пары соответствующих процессов, происходящих в областях А и Б.

Следует также понимать, что причиной такого рода всеобщего изменения темпа процессов, происходящих в одной точке пространства по отношению к темпу процессов, происходящих в другой точке пространства, могут быть только силы, действию которых в одинаковой мере подвержены все материальные объекты. С таким случаем мы встречаемся в релятивистской теории тяготения, где только

благодаря всеобщности гравитационного взаимодействия произошли дальнейшие изменения метрики пространства и времени.

Если аналогичный вопрос о времени рассмотреть заменив области пространства А и В двумя движущимися относительно друг друга инерциальными системами координат K и K^1 , то получим пример, имеющий прямое отношение к специальной теории относительности. Однако прежде следует сказать несколько слов о смысле, вкладываемом в понятие системы отсчета, так как этот вопрос был основательно запутан некоторыми авторами, пытавшимися строить "материалистическое" обоснование теории относительности на незаконном превращении системы отсчета в тело отсчета, а тело отсчета - в материю.

Специальная теория относительности формирует законы движения материи не относительно конкретных материальных систем или так называемых тел отсчета, а относительно абсолютно инерциальных систем координат, выражающих в абстрактной форме свойства, присущие реально существующему инерциальному движению тел. Как правильно отметил П.Г.Кард^{х)}: "... инерциальная система не обязательно должна быть представлена (или реализована) каким-либо телом или средой, но в принципе всякая инерциальная система реализуема, то есть принципиально возможно, что какое-либо тело покоится в ней, хотя бы и кратковременно".

С количественной стороны время и пространство, относящиеся к какой-либо системе отсчета, определяются всем ходом происходящих в мире физических процессов, находящихся в определенном отношении к данной системе координат. Дело осложняется лишь тем обстоятельством, что, используя строгое определение системы отсчета, как абстрактной математической схемы, мы можем только условно говорить о каких-либо процессах как о процессах, происходящих в некоторой системе координат. Действительно, бесконечность пространственных и временной осей означает, что каждая система отсчета в принципе может быть использована для пространственно-временной координации любых событий и процессов, происходящих в мире. Следовательно, и каждый конкретный процесс может быть отнесен к любой системе координат. Поэтому, для того, чтобы выяснить пространственно-временную структуру одной системы по отношению к пространственной временной структуре другой системы отсчета, иначе говоря, установить

^{х)} Журнал "Вопросы философии" № 5 1952 г. стр. 242.

пространственно-временные преобразования, необходимо всякому рассмотренному относительно системы K процессу сопоставить аналогичный процесс, находящийся в тех же самых физических условиях, но уже относительно другой системы K^1 . Поясним это на конкретном примере. Пусть для выяснения общего темпа процессов относительно системы K рассматривается ряд таких физических процессов: колебание определенного электрического вибратора, покоящегося в системе K ; радиоактивный распад каких-либо определенных ядер, покоящихся относительно системы K ; движение продуктов распада этих ядер относительно системы K ; движение электронов, ускоренных в конкретной трубке, покоящейся в системе K ; распространение света относительно системы K , испущенного источником, покоящимся в этой системе отсчета (ряд A). Тогда и при рассмотрении процессов относительно системы K^1 мы должны выбрать аналогичные физические процессы, которые составят ряд B . Но это будут подобные процессы, а не те же самые в буквальном смысле слова, так как электрический вибратор, радиоактивные ядра тех же элементов, ускорительная трубка и источники света должны быть взяты покоящимися уже относительно системы K^1 . Число выбранных для рассмотрения процессов может быть неограниченно увеличено. Более того, любой происходящий в мире физический процесс может быть включен в ряд A , и ему всегда может быть сопоставлен аналогичный процесс, который необходимо будет добавить для рассмотрения в ряд B .

Протекающие независимо друг от друга физические процессы каждого ряда находятся между собой в определенных кинематических соотношениях, которые проявляются, в частности, в том, что за одно колебание эталонного вибратора распадается определенная доля выбранных радиоактивных ядер; свет, отражаясь от зеркал, расположенных на некотором расстоянии, пройдет это расстояние определенное число раз; электроны, ускоренные в трубке, и α -частицы от распада ядер могут пройти тот же самый отрезок соответствующее число раз и т.д. Эти кинематические отношения между различными физическими процессами существуют объективно, и установление их представляет основную задачу экспериментальной физики. Любое исследование какого-либо процесса всегда фактически состоит в изучении его свойств по отношению к другим, уже изученным процессам.

Согласно принципу относительности, все физические явления протекают относительно различных инерциальных систем координат одинаковым образом. В прин-

ципе относительности фактически идет речь о проведенных в различных инерциальных системах сопоставления физических процессов, взятых при одних и тех же начальных условиях в каждой системе координат. Очевидно, что в наиболее общей математической формулировке этого принципа речь должна идти именно об объективных отношениях различных физических процессов. Так, можно будет сделать утверждение, что согласно принципу относительности соотношение между физическими величинами, характеризующими различные физические процессы, остается неизменным в любых инерциальных системах координат для соответствующих процессов, происходящих относительно этих систем в одинаковых физических условиях. Эта формулировка отличается большей общностью, чем требование инвариантности законов физики относительно каких-либо конкретных преобразований пространства и времени.

В рассматриваемом примере для выполнения принципа относительности достаточно будет потребовать сохранения соотношений между процессами ряда Б такими же, как соотношения между процессами ряда А. Вопрос же о том, как отнесется общий темп процессов ряда А к общему темпу процессов Б, иначе говоря, вопрос о соотношении между временем t в системе К и временем t' в системе K^1 не может быть решен на основании принципа относительности. Не располагая в действительности данными для решения этого вопроса, классическая физика бездоказательно принимала $t = t'$, считая фактически время самостоятельной сущностью, не зависящей и от свойств движения самой материи. Только с установлением факта независимости скорости света от движения источника появилась возможность решения вопроса о соотношении ритмики процессов, происходящих относительно различных систем координат. В специальной теории относительности время t оказалось связано с временем t' соотношением Лоренца $t = \gamma t' + \frac{v}{c^2} \gamma x'$, где $\gamma = 1 / (1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2}$, которое означает, что процессы ряда Б отличаются от процессов ряда А общей ритмикой и наличием сдвига в одновременности. Используя преобразования Лоренца, можно непосредственно выразить эти общие различия в ходе процессов, получив соотношение между скоростями движения соответствующих процессов в системах К и K^1 , выраженных в единых пространственно-временных единицах. Это соотношение между скоростями не только полностью тождественно группе Лоренца, но представляет непосредственно выраженное внутреннее содержание этой группы пре-

образований. В связи с последним утверждением более правильно будет получить это соотношение не из преобразований Лоренца, а из принципов, положенных в основу обычного построения теории относительности и содержащих, как мы уже отмечали, сведения, достаточные для установления соотношения между общей ритмикой процессов в различных системах координат.

Из факта независимости скорости света от состояния движения источника следует, что, если интересоваться лишь скоростью распространения света, а не его частотой, то в ряд А и Б могут быть включены для рассмотрения процессы, состоящие в движении одного и того же фотона относительно различных систем К и K^1 . Будем считать систему К исходной системой, в которой скорости движения в различных процессах не зависят от направления движения и находятся между собой в определенных кинематических отношениях. Тогда, если свет относительно исходной системы К распространяется со скоростью С, то относительно системы K^1 он должен иметь скорость $c - v$ в направлении движения системы K^1 и $c + v$ — в противоположном направлении. Это заключение в общепринятом изложении теории относительности слишком поспешно отбрасывается как ошибочное, чем и устраняется возможность очень простого понимания теории относительности. На самом деле скорость света относительно системы K^1 , выраженная с помощью пространственно-временных единиц, относящихся в рассматриваемом случае к системе К, действительно равна $c - v$ в одном направлении и $c + v$ — в другом. А.Эйнштейн в своей знаменитой работе "К электродинамике движущихся тел" поставил вопрос о существовании в системе K^1 своего собственного времени t' , которое течет таким образом, что скорость распространения света относительно системы K^1 в новых пространственно-временных единицах принимает значение С. Для установления связи собственного времени с временем исходной системы К ("покоящаяся система") он рассмотрел распространение света относительно K^1 ("движущаяся система"), потребовав чтобы этому движению соответствовали скорости $c - v$ и $c + v$ при использовании пространственно-временных единиц системы К и скорость С — в единицах системы K^1 . Но вместо разъяснения того обстоятельства, что наличие в движущейся системе собственного времени t' , отличного от времени исходной системы, означает существование общих для всех процессов в системе K^1 изменений ритмики по отношению к ритмике процессов в исходной системе К, А.Эйнштейн обратился к рассуждениям об особой роли синхронизации часов световым сигналом.

Утверждая, что в системе K^1 , движущейся относительно исходной системы K со скоростью v , скорость распространения света, выраженная в пространственно-временных масштабах исходной системы, равна $c - v$ и $c + v$ (или в общем случае $u_c^x = (c^2 - v^2 \sin^2 \theta^x)^{1/2} - v \cos \theta^x$, где θ^x угол в системе K^1 между направлением распространения света и направлением движения системы), классическая физика вовсе не совершала ошибки. Ее ошибка состояла в том, что рассматривая изолированно процесс распространения света, она даже не обсуждала возможности соответствующих изменений во всех физических процессах, приводящих к распространению принципа относительности на все процессы, включая и электромагнитные. Из принципа относительности, принятого в наиболее общей форме, вовсе не следует, что скорость света относительно движущейся системы K^1 , определенная по единому абсолютному времени классической физики, не может быть равна $c - v$ в направлении движения системы и $c + v$ — в противоположном направлении. Принцип относительности на самом деле только утверждает, что отношение скорости света в системе K^1 к скоростям движения для любых других процессов, происходящих в этой системе, должно быть точно таким же, как и отношение скорости света к скоростям аналогичных физических процессов в исходной системе K . Можно показать, что для выполнения принципа относительности необходимо, чтобы в движущейся системе K^1 произошли всеобщие изменения в скоростях движения всех процессов, удовлетворяющие двум следующим условиям:

1) Для любого процесса разность между временем распространения на некоторое расстояние в одном направлении и временем распространения в обратном направлении должна быть равна той же величине, что и для света.

2) Отношение суммарного времени распространения какого-либо процесса на некоторое расстояние и обратно к суммарному времени распространения света на это же расстояние и обратно должно оставаться в движущейся системе K^1 таким же, как и в исходной системе для соответствующего процесса.

Из этих условий^{x)} однозначно вытекает соотношение, связывающее для какого-либо произвольного физического процесса скорость движения $u^x(\theta^x)$

^{x)} См. Приложение 1.

относительно движущейся системы K^1 со скоростью движения u относительно исходной системы K для аналогичного процесса, происходящего в тех же физических условиях. Это соотношение имеет следующий вид:

$$u^x(\theta^x) = \frac{u(1 - v^2/c^2)}{(1 - \frac{v^2}{c^2} \sin^2 \theta^x)^{1/2} + \frac{uv}{c^2} \cos \theta^x} \quad (a)$$

и, в частности,

$$u^x(0) = \frac{u(1 - \frac{v^2}{c^2})}{1 + \frac{uv}{c^2}} \quad \text{и} \quad u^x(\pi) = \frac{u(1 - \frac{v^2}{c^2})}{1 - \frac{uv}{c^2}}$$

В приведенном соотношении на языке классических представлений о времени и пространстве выражаются лежащие в основе специальной теории относительности изменения скоростей движения во всевозможных процессах в различных инерциальных системах координат.

Изменение скоростей пространственного перемещения для всех без исключения процессов, происходящих в движущейся системе K^1 , должно с необходимостью сопровождаться соответствующим изменением и всех других форм движения материи, в том числе и не сводимых к механическому движению. Следовательно, в движущейся системе по отношению к исходной системе, которую мы условно считаем неподвижной, изменится не только скорость распространения света и скорость движения альфа-частиц, испущенных покоящимися в этой системе ядрами, но соответственно требованию принципа относительности изменится также период полураспада данных ядер, изменится и частота света, излучаемого покоящимися в этой системе атомами и т.д. А это означает, что никакого изменения скорости процесса в движущейся системе не существует по отношению к другим процессам в этой системе. Действительно, все физические процессы изменили свою скорость таким образом, что соотношение между скоростями движения в этих процессах осталось точно таким же, как и в исходной системе для тех же

процессов. Изменения же в физических процессах движущейся системы обнаруживают себя только по отношению к процессам, воспроизведенным в тех же условиях в другой системе. Таким образом, реально существуют только относительные изменения скоростей движения во всех физических процессах, т.е. изменения процессов, происходящих в одной инерциальной системе, по отношению к процессам, происходящим в другой инерциальной системе. Этими относительными изменениями скоростей физических процессов и обуславливается постоянство скорости распространения света относительно любых инерциальных систем координат. Надо понять, что постоянство скорости света характеризует не столько сам процесс распространения света, сколько его отношение к другим физическим процессам,

Таким образом, еще в рамках дорелятивистской механики можно было бы установить, что для физических процессов в величинах скоростей распространения относительно некоторой инерциальной системы координат оказывается возможным допустить такую зависимость от направления, которую никакими физическими опытами в данной системе невозможно отличить от случая изотропного пространства. В реализации этой возможности и состоит единственный способ осуществления в природе независимости скорости распространения света от движения источника без нарушения принципа относительности.

Невозможно задать такое абсолютное время, при использовании которого удалось бы выразить относительно различных инерциальных систем координат скорости происходящих в мире процессов независимо от направления. Такое время будет неравноправно относиться к различным инерциальным системам координат, выделяя из них всегда лишь одну систему, относительно которой скорости физических процессов определяются независимо от направления распространения. Так, при использовании нами ранее времени t и соответствующих ему пространственных единиц лишь относительно исходной системы K скорости физических процессов выражались независимо от направления распространения. В любой другой инерциальной системе координат, движущейся относительно исходной, при использовании времени t выявляется общая для всех процессов анизотропия, которая не нарушает принципа относительности и, следовательно, не может быть обнаружена никакими опытами внутри данной системы. Но тем не менее эта анизотропия в процессах системы K^1 существует объективно по отношению к процессам в исходной системе K и проявляется на опыте в качестве многочисленных релятивистских

эффектов. Но так как инерциальная система K^1 по своим физическим свойствам полностью равноправна с исходной системой, то должно существовать время t' и соответствующие ему пространственные единицы, при использовании которых изотропия в скоростях, происходящих в мире физических процессов имеет место только относительно системы K^1 . В этом случае при выражении скоростей физических процессов в системе K , принятой ранее за исходную, обнаружится анизотропия, соответствующая соотношению (а) с измененным знаком относительной скорости движения систем координат.

Таким образом, после того, как установлена единственная возможность совмещения факта независимости скорости распространения света от движения источника с принципом относительности, состоящая в допущениях всеобщих относительных изменений в скоростях физических процессов, мы с неизбежностью должны придти к признанию существования в системе K^1 собственного времени t' , отличного от времени исходной системы. Время в движущейся системе координат, определяемое не какими-то особо выбранными измерительными процедурами, а отнесенными к этой системе физическими процессами, оказывается отличным от времени в других системах в силу существования относительных изменений в движении материи. Поэтому не следует удивляться тому, что промежутку между двумя конкретными событиями, происшедшими в мире, в разных инерциальных системах соответствуют различные интервалы времени. Ведь этот результат означает только, что за данный промежуток в разных системах успеют произойти различные в количественном отношении изменения в одинаковых процессах.

Ограниченность классических представлений о времени и о пространстве состоит не в том, что при распространении процессов в различных инерциальных системах используется время одной исходной системы, а в том, что это время исходной системы считается единственно возможным. Само же рассмотрение кинематических характеристик физических процессов относительно одной инерциальной системы, использующее время другой инерциальной системы, допустимо, конечно, и в рамках релятивистских представлений о времени и пространстве. Так, например, как в классической, так и в релятивистской теории может быть поставлен следующий вопрос: в течение какого времени в некоторой системе распространяется свет от одного конца стержня до его другого конца, если стержень движется

в данной системе со скоростью v ? В классической теории ответ будет найден просто делением длины стержня на скорость света относительно этого стержня, равную в зависимости от направления распространения света величине $(c - v)$ или $(c + v)$. В релятивистской теории даже при одностороннем понимании постоянства скорости распространения света относительно различных инерциальных систем на основе преобразований Лоренца будет найден ответ, равный частному от деления длины движущегося стержня с учетом его сокращения (иначе говоря, длины стержня в исходной системе) на скорость света относительно движущегося стержня, определенную по времени исходной системы, то есть на величину, также равную $(c - v)$ или $(c + v)$. Подобная задача встречается, например, в импульсной технике при определении времени совпадения двух электрических импульсов, распространяющихся по высокочастотному кабелю навстречу друг другу, и при подсчете числа соударений частиц на встречных пучках. Во всех этих задачах производится простое сложение скоростей, так как слагаемые выражены в одних и тех же пространственно-временных единицах. Релятивистская же формула сложения скоростей относится к скоростям, выраженным с помощью отличных друг от друга пространственно-временных единиц различных систем координат. Отличие ее от формулы простого сложения как раз и обусловлено учетом различия единиц измерения. Особенность правила сложения скоростей в теории относительности той же самой природы, что и особенность вычисления общего веса тела, если вес одной его части выражен в килограммах, а другой - в фунтах.

Новые преобразования, связывающие пространственно-временные координаты одной инерциальной системы с координатами другой системы, могут быть непосредственно найдены из соотношения (а) при рассмотрении любого физического процесса^{х)}. Преобразования при этом находятся из условия, что скорость некоторого процесса в движущейся системе K^1 , равная при определении по времени исходной системы $u^x(\theta^x)$, в случае определения в пространственно-временных единицах собственной системы K^1 должна быть равна, независимо от направления движения, той же величине, что и скорость аналогичного физического процесса в исходной системе, то есть равна u . Обычно при определении преобразований Лоренца так всегда и поступают, но только вместо произвольного физического процесса рассматривают соотношение (а) лишь для распространения

х) См. Приложение 11.

света, когда $u = c$. Отсюда и получается ложное впечатление, что приводимые в обоснование новых физических свойств пространства и времени чуждые науке махистские рассуждения об особой роли световой сигнализации и о принципиальном значении выбора измерительной операции имеют будто бы отношение к самому физическому содержанию теории. (Это заблуждение о значении световой сигнализации в теории относительности настолько велико, что некоторые авторы пытались обосновать его с позиций диалектического материализма). Поэтому, если и пользоваться рассмотрением распространения света для определения преобразований Лоренца, то следует помнить, что для этой цели пригоден и любой другой физический процесс. Кроме того, следует помнить, что произвольно выбранный процесс выступает здесь не в виде непосредственной сигнализации или измерительной операции, а как связующее звено, теоретически используемое для установления соотношений между объективными пространственно-временными величинами в различных движущихся системах.

Характерные особенности новых пространственно-временных соотношений, соответствующих сформулированным в соотношении (а) относительным изменениям в движении материи, можно понять из простого анализа соотношения (а). Так, например, относительность одновременности следует из того факта, что для всех физических процессов скорости движения относительно одной системы, определенные по времени другой системы, обнаруживают такую зависимость от направления, что время движения в одном направлении отличается от времени движения в обратном направлении на постоянную для всех процессов величину.

С другой стороны, различие в одновременности движущихся друг относительно друга систем вызывает относительные изменения и в пространственной метрике этих систем. Тот или иной пространственный отрезок одной системы движется в другой системе, и поэтому длина этого отрезка во второй системе может обнаруживать себя только согласно объективной одновременности этой второй системы, обусловленной движением материи.

x

x

x

Анализ физического содержания теории относительности не исчерпывается установлением конкретных свойств движения материи, определяющих новые физические свойства пространства и времени. Для более полного понимания материалистической сущности теории необходимо также вскрыть и те объективные свой-

ства материи, которыми вызываются эти относительные изменения в движении материи. Причина возникновения тех или иных кинематических соотношений между физическими процессами, отнесенными к различным инерциальным системам отсчета должна, безусловно, заключаться в самих свойствах взаимодействия материальных объектов. Пространство и время в специальной теории относительности наделяются теми новыми физическими свойствами, которые обусловлены изменением взаимодействия материальных объектов в зависимости от скорости их относительного движения. Путем самых простых рассуждений нетрудно убедиться, что в основе относительных изменений движения материи, соответствующих соотношению (а), лежит единый для различных по своей природе взаимодействий закон изменения взаимодействия с увеличением относительной скорости взаимодействующих объектов. Это изменение взаимодействия будет учтено в законах движения, если принять, что инертная масса частиц возрастает с увеличением их относительной скорости движения. Если при рассмотрении произвольного физического явления относительно движущейся системы координат и сопоставлении его с аналогичным явлением, происходящим относительно исходной системы в тех же физических условиях, учесть возрастание массы движущихся объектов, то в движении материи мы обнаружим относительные изменения, описываемые соотношением (а). Для перехода же от соотношения (а) к релятивистским пространственно-временным преобразованиям, как это уже было показано выше, необходимо только, опираясь на марксистское определение пространства и времени как объективных форм бытия материи, сделать вывод о зависимости свойств пространства и времени от характера движения материи. Таким образом, специальная теория относительности выражает те общие свойства движения материи, которые обусловлены конечной скоростью распространения взаимодействия, зависимостью взаимодействия, зависимостью взаимодействия от скорости относительного движения материальных объектов.

Зависимость взаимодействия материальных объектов от их относительной скорости движения обычно при изложении теории относительности трактуется как следствие релятивистских свойств пространства и времени. В этом отношении в обычном построении теории все поставлено "с ног на голову". Не свойства движущейся материи определяют физические свойства пространства и времени, а наоборот, возрастание массы материального объекта при увеличении относительной скорости

движения объявляется следствием пространственно-временных преобразований Лоренца. Сама возможность математическим путем получить из преобразований Лоренца закон изменения массы указывает только на взаимосвязь свойств пространства и времени со свойствами взаимодействия материи, и, конечно, не доказывает, что пространству и времени в этой взаимосвязи принадлежит определяющая роль. На этот вопрос ответ дает диалектический материализм, который учит, что в единстве формы и содержания определяющим является содержание, что содержание, развитие содержания всегда предшествуют возникновению и развитию формы.

Следует иметь в виду, что на практике в теоретической физике новые свойства пространства и времени не обязательно должны определяться по общим законам движения, полученным в рамках старой метрики пространства и времени. Эта задача, как правило, оказывается чрезвычайно сложной. Сложность этой задачи является результатом противоречия, существующего между новыми законами движения и старой формой, не соответствующей новому содержанию. Поэтому на практике новую метрику находят не по общим законам, а лишь по отдельному какому-либо процессу, закон которого известен. Но если свойства пространства и времени считать следствием общих свойств движения материи, то определение метрики пространства и времени по процессу, изменения в котором известны, означает, что соответствующие изменения предполагаются и в отношении всех остальных физических процессов. Теоретические методы получения метрики пространства и времени могут быть самыми различными, и в любом из них всегда может быть достаточно ясно вскрыта материалистическая сущность новых свойств пространства и времени. Ясно, что материалистическое обоснование новых свойств пространственно-временной метрики не должно обязательно следовать теоретическому методу нахождения новой метрики. В этом отношении академик В.А.Фок, сделавший чрезвычайно много для материалистического понимания общей теории относительности, допускает неточность, утверждая, что "свет и закон распространения света играют основную роль в определении пространственных понятий и способах измерения геометрических величин"^{х)}. Совершенно очевидно, что если бы поле тяготения, искривляя путь светового луча, не вызывало соответствующих изменений в движении всех остальных материальных объектов, то ни о какой новой метрике пространства и времени в поле тяготения не было бы и речи.

^{х)} Журнал "Природа" № 12 (1953г.).

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 не возникло, должно отражать наряду с новыми и обязательно всеобщими свойствами движения материи также и ранее установленные свойства пространства и времени. Думать, что при переходе к новой области физического исследования могут быть отвергнуты общие свойства движущейся материи, определяющие ранее установленные физические свойства пространства и времени, также нелепо с точки зрения диалектико-материалистического понимания природы, как и допускать возможность нарушения закона сохранения энергии в областях физики, пока еще мало изученных. Наглядным примером развития физического учения о пространстве и времени может служить релятивистская теория тяготения, которая целиком включает в себя содержание специальной теории относительности.

Развитие общей теории относительности началось с попыток сделать закон тяготения Ньютона инвариантным относительно преобразований Лоренца, иначе говоря, с попыток учесть в законе тяготения, что гравитационное воздействие распространяется со скоростью C и изменяется с увеличением относительной скорости движения тел. Но одновременно с этой задачей в общей теории относительности была решена и другая задача. Были найдены те новые свойства пространства и времени, которые обусловлены непосредственно гравитационным взаимодействием. Поле тяготения в отличие, например, от электромагнитного поля приводит к изменению метрики пространства и времени только потому, что действию этого поля одинаковым образом подвержены все формы движущейся материи. Общая теория относительности включает частную теорию относительности не только как предельный случай, справедливый при отсутствии больших гравитационных полей. Общая теория относительности и при наличии больших гравитационных полей учитывает те свойства пространства и времени, которые обусловлены конечной и постоянной по величине скоростью распространения гравитационного действия.

Очень часто об общей теории относительности говорят как о теории, в которой нарушен действующий в специальной теории принцип постоянства скорости распространения света. Путаница в этом вопросе приводит к большим недоразу-

меням. Прежде всего в специальной теории относительности скорость распространения света относительно движущихся инерциальных систем постоянна только при определении ее по собственным пространственно-временным координатам. Если же скорость света в различных инерциальных системах определять по одному времени, то только в одной системе координат скорость света будет постоянной и не зависящей от направления распространения; в остальных же системах скорость света будет иметь различные значения в зависимости от направления распространения света. В общей теории относительности скорость света, определенная в каждой точке пространства по собственному времени, имеет постоянное значение, равное c . Скорость света при наличии гравитационного поля меняется от одной точки пространства к другой, если определять ее по мирному времени. Наоборот, частота света остается неизменной в мировом времени и меняется в собственном времени.

П р и л о ж е н и е 1.

В случае независимости скорости света от движения источника для выполнения принципа относительности необходимо в движущейся системе K^1 по отношению к исходной системе K , принятой условно за неподвижную, допустить существование всеобщих изменений в скоростях движения всех процессов, удовлетворяющих приведенным на странице 10 условиям. На основании первого условия получаем соотношение

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{\ell}{u^x(\theta^x)} - \frac{\ell}{u^x(\theta^x + \pi)} = \frac{\ell}{u_c^x(\theta^x)} - \frac{\ell}{u_c^x(\theta^x + \pi)} \quad (1)$$

Здесь $u^x(\theta^x)$ - скорость распространения произвольного физического процесса относительно системы K^1 , выраженная в пространственно-временных единицах исходной системы K ; θ^x - угол, образованный направлением распространения данного физического процесса в системе K^1 и направлением движения системы K^1 относительно систем K . Таким образом выраженная скорость известна пока нам лишь для процесса распространения света на основании независимости его скорости от движения источника

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

Используя данное выражение для u_c^x , из соотношения (1) получим первое уравнение для скорости $u^x(\theta^x)$ произвольного процесса.

$$\frac{1}{u^x(\theta^x)} - \frac{1}{u^x(\theta^x + \pi)} = \frac{2 \frac{v}{c^2} \cos \theta^x}{1 - v^2/c^2} \quad (1a)$$

На основании второго условия (см. стр. 10) получаем соотношение

$$\frac{t_u}{t_c} = \frac{\ell / u^x(\theta^x) + \ell / u^x(\theta^x + \pi)}{\ell / u_c^x(\theta^x) + \ell / u_c^x(\theta^x + \pi)} = \frac{c}{u} = \text{const.} \quad (3)$$

Подставляя сюда выражение для u_c^x (2), получим второе уравнение

$$\frac{1}{u^x(\theta^x)} + \frac{1}{u^x(\theta^x + \pi)} = \frac{2(1 - v^2/c^2 \sin^2 \theta)}{u(1 - v^2/c^2)} \quad (3a)$$

Решая систему из двух уравнений (1a) и (3a), найдем выражение скорости распространения произвольного физического процесса относительно движущейся системы K^1 $u^x(\theta^x)$ через величину скорости u аналогичного физического процесса, происходящего в тех же самых условиях в исходной системе K ,

$$u^x(\theta^x) = \frac{u(1 - v^2/c^2)}{(1 - v^2/c^2 \sin^2 \theta^x)^{1/2} + \frac{uv}{c^2} \cos \theta^x} \quad (a)$$

Приложение II

Покажем каким образом может быть осуществлен переход от соотношения (а), описывающего реальные относительные изменения в движении материи, к преобразованиям Лоренца, отражающим связь между пространственно-временными метриками движущихся относительно друг друга систем координат. Пусть прямоугольные оси координат в исходной системе K параллельны осям системы K^1 , движущейся в направлении оси X -ов со скоростью v . Требуется выразить пространственно-временные координаты какого-либо события в движущейся системе K^1 через координаты этого события в исходной системе K . Если пространственно-временную метрику в движущейся системе координат условно определить с помощью классических преобразований Галилея $x^x = x - vt$, $y^x = y$, $z^x = z$, $t^x = t$, то скорость $u^x = \sqrt{\left(\frac{dx^x}{dt^x}\right)^2 + \left(\frac{dy^x}{dt^x}\right)^2 + \left(\frac{dz^x}{dt^x}\right)^2}$ некоторого произвольного процесса в движущейся системе может быть выражена с помощью соотношения (а) через скорость $u = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}$ аналогичного процесса, происходящего в исходной системе в тех же физических условиях. Собственная же пространственно-временная метрика в движущейся системе такова, что определенные с ее помощью скорости $u' = \sqrt{\left(\frac{dx'}{dt'}\right)^2 + \left(\frac{dy'}{dt'}\right)^2 + \left(\frac{dz'}{dt'}\right)^2}$ различных процессов в этой системе имеют те же значения, что и скорости аналогичных процессов в исходной системе, т.е. $u' = u$.

Будем считать, что искомые преобразования являются линейными функциями

$$x' = \lambda(v)(x - vt), \quad y' = \mu_1(v)y, \quad z' = \mu_2(v)z, \quad (4)$$

$$t' = \eta(v)t + \alpha(v)x + \beta(v)y + \gamma(v)z.$$

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 относительно друг друга инерциальным системам координат.

Это обоснование линейности функций преобразования координат тесно связано с принципом относительности, поскольку само содержание принципа относительности может быть сформулировано только после того, как дано однозначное определение понятию инерциального движения.

Для определения пространственно-временных преобразований нам необходимо найти коэффициенты $\lambda(v)$, $\mu_1(v)$, $\mu_2(v)$, $\eta(v)$, $a(v)$, $\beta(v)$, $\gamma(v)$. Из того факта, что пространство изотропно и физически выделена только ось x , совпадающая с направлением движения системы K^1 , следует $\mu_1(v) = \mu_2(v) = \mu(v)$ и $\beta(v) = \gamma(v) = 0$. Для определения коэффициентов λ , μ , η и a рассмотрим некоторый произвольно выбранный физический процесс, распространяющийся в системе K^1 в направлении оси x . Скорость этого процесса, определенная с помощью классической пространственно-временной метрики, согласно соотношению (а) должна быть равна

$$u^x = \frac{dx^x}{dt^x} = \frac{dx}{dt} - v = \frac{\frac{dx'}{dt'}(1 - v^2/c^2)}{1 + v/c^2 \frac{dx'}{dt'}} \quad (5)$$

Отсюда скорость распространения этого процесса относительно исходной системы будет равна

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\frac{dx'}{dt'} + v}{1 + v/c^2 \frac{dx'}{dt'}} \quad (6)$$

Выражая в соотношении (6) величину $\frac{dx'}{dt'}$ с помощью преобразований (4), получим

$$\frac{dx}{dt} = \frac{(\lambda + va) \frac{dx}{dt} + v(\eta - \lambda)}{\eta - v^2/c^2 \lambda + (a + \lambda v/c^2) \frac{dx}{dt}} \quad (7)$$

Для того, чтобы это равенство выполнялось для различных произвольных значений скорости $\frac{dx}{dt}$, необходимо потребовать выполнения следующих тождеств:

$\eta(v) \equiv \lambda(v)$ и $a(v)/\lambda(v) \equiv -v/c^2$. Таким образом, искомые преобразования могут быть теперь представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned}x' &= \lambda(v) [x - vt], & y' &= \mu(v) y, \\z' &= \mu(v) z & \text{и} & & t' &= \lambda(v) \left[t - \frac{v}{c^2} x \right].\end{aligned}\quad (7)$$

Совершенно ясно, что если бы система K^1 двигалась бы со скоростью $(-v)$ в направлении отрицательных значений координат оси x , то преобразования ввиду имеющейся симметрии не должны измениться. А это означает, что

$$\lambda(v) = \lambda(-v), \quad \mu(v) = \mu(-v). \quad (8)$$

В силу физической равноправности инерциальных систем координат преобразования, связывающие координаты x , y , z и t с координатами системы K^1 , должны иметь следующую форму

$$x = \lambda(-v) (x' + vt'), \quad y = \mu(-v) y', \quad z = \mu(-v) z' \quad (9)$$

и

$$t = \lambda(-v) \left(t' + \frac{v}{c^2} x' \right).$$

Разрешая же соотношения (7) относительно переменных x , y , z , t , получим

$$\begin{aligned}x &= \frac{x' + vt'}{\lambda(v) (1 - v^2/c^2)}, & y &= \frac{1}{\mu(v)} y', & z &= \frac{1}{\mu(v)} z', \\ \text{и} & & t &= \frac{t' + v/c^2 x'}{\lambda(v) (1 - v^2/c^2)}.\end{aligned}\quad (10)$$

Сравнивая эти соотношения с преобразованиями (9) и принимая во внимание равенства (8), найдем

$$\lambda(v) = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \text{и} \quad \mu = 1. \quad (11)$$

В результате получаем лоренцевские пространственно-временные преобразования

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z \quad \text{и} \quad t' = \frac{t - v/c^2 x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (12)$$

Рукопись поступила в издательский отдел
7 июля 1961 года.