



объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

627-85

P2-85-627

А.А.Тяжкин

НОВЫЙ ПОДХОД В ПРЕПОДАВАНИИ ОСНОВ
РЕЛЯТИВИСТСКОЙ МЕХАНИКИ

Направлено на Всесоюзное совещание "Основы классической механики и их роль в преподавании механики" /1-3 октября 1985 г., Москва/

1985

Теория относительности — это физическая теория. Но область ее приложения не ограничена рамками одного из традиционных разделов физики. Она в равной степени относится и к оптике и электродинамике, и к механике и термодинамике, и к ядерным (сильным) взаимодействиям и слабым взаимодействиям, обуславливающим процесс распада элементарных частиц. Теория эта устанавливает те общие свойства любых физических объектов, которые связаны с существованием предельной скорости передачи любого взаимодействия, равной скорости распространения света в пустоте. Качественно новые выводы теория относительности дает при скоростях относительного движения физических объектов, сопоставимых со скоростью света. Ее основной, хотя и неявной исходной посылкой является отсутствие в природе скоростей движения материальных объектов, превышающих скорость света.

Отмеченная выше универсальность всех выводов теории относительности лежит в основе последовательного теоретического построения в качестве необходимой посылки, любое отступление от которой ведет к нарушению целостности всего построения и даже к реабилитации представлений об абсолютном движении. Однако, как было отмечено в работах /1, с.653; 2, с.3,70/, на это важнейшее положение теории совсем не обращается внимание в многочисленных курсах, посвященных релятивистской теории. Далее мы покажем, что это **отнюдь** не случайное обстоятельство, а результат догматизации некоторого ограниченного понимания теории, для которого характерен и целый ряд других пробелов.

Мы остановимся на обсуждении недостатков утвердившегося в физике понимания релятивистской теории, поскольку без их устранения, на наш взгляд, невозможно правильное решение поставленного в программе настоящего совещания вопроса о размерах и характере сведений, приносимых в преподавание теоретической механики из релятивистской механики.

Не способствует уяснению универсальной сущности теории относительности даже само принятое для нее название, вернее, фигурирующий в названии неудачный эпитет — специальная или частная.

Отмеченная завуалированность исходной универсальности всех положений специальной теории относительности (СТО) мешает и уяснению истинного соотношения между законами электродинамики и законами механических явлений при больших скоростях движения. Немало способствует путанице и обычно приводимое в курсах утверждение, что теория относительности распространила действовавший в механике принцип относительности на электромагнитные явления. Утверждение противоположного характера было бы ближе к истине.

Действительно, обнаруженная для законов электродинамики инвариантность относительно преобразований Лоренца была распространена и на механические явления, что было сопряжено с отказом от принятого Галилеем принципа относительности и заменой его совершенно новым по форме принципом относительности. Хотя теория относительности возникла в результате разрешения проблем, поставленных экспериментальными исследованиями оптических и электромагнитных явлений, однако само решение этих проблем было достигнуто без каких-либо изменений электродинамики Лоренца — Максвелла, путем соответствующей трансформации законов классической механики в области больших скоростей движения. Таким образом, изменению подверглись законы яв-

ний, для которых тогда не было каких-либо прямых экспериментальных указаний о их неточности. Объяснение же парадоксальных результатов оптических опытов было достигнуто, фактически, приведением в соответствие с установленными законами электродинамики всех остальных законов физики. Этот необычный путь разрешения проблемы вовсе не подчеркивается в традиционном изложении теории относительности, где он обойден введением новых представлений о пространстве и времени.

Однако для понимания существа дела чрезвычайно полезно сформулировать найденное решение проблемы, не прибегая к новым представлениям о пространстве и времени. Установив в рамках прежних представлений о времени и пространстве универсальные кинематические свойства, отвечающие единому для всех физических явлений принципу относительности, можно затем ставить вопрос о введении в каждой инерциальной системе собственных пространственно-временных координат, отражающих специфику общих свойств физических процессов. Такой подход поможет глубже уяснить подлинный смысл введения новых пространственно-временных преобразований. Пока наметим общую канву требуемой переформулировки проблемы, чтобы показать, что речь идет о весьма простых вещах и фактах, полностью соответствующих истории создания теории относительности. Кроме того, исторический экскурс позволяет наглядно убедиться, что в пионерских работах предшественников А.Эйнштейна достаточно явно представлены начала того более глубокого понимания теории относительности, которому посвящен настоящий доклад.

ИСТОРИЯ ВЫЯСНЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОСТИ УСТАНОВЛЕННЫХ В ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ ЗАКОНОВ ТРАНСФОРМАЦИИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ОТ ИСХОДНОЙ К ДВИЖУЩЕЙСЯ СИСТЕМЕ ОТСЧЁТА

Установленные в XIX веке законы электромагнитных явлений оказались инвариантными относительно преобразований Галилея. Это обстоятельство привело к, казалось бы, очевидному выводу о возможности

обнаружения абсолютного движения относительно выделенной системы покоя эфира. Однако соответствующие эксперименты, в которых надеялись обнаружить абсолютное движение Земли, дали отрицательный результат. В физике возникла критическая ситуация: одна из исходных посылок, приведших к "очевидному" выводу о возможности наблюдения эфирного ветра, оказалась неверной. Учитывая высокую надежность и точность проведенных экспериментов, самым естественным было заподозрить несправедливость ранее установленных законов электродинамики. На этот путь поиска решения проблемы встал известный немецкий физик Г.Герц. Он видоизменил законы электромагнитных явлений, придав им вид, инвариантный относительно преобразований Галилея. Но наука не приняла предложенного Герцем пути, поскольку, объяснив отрицательные результаты попыток обнаружения движения Земли, уравнения Герца разошлись с результатами других достоверных оптических опытов. Именно про этот отвергнутый наукой путь вполне правильно было бы сказать, что он заключался в распространении на электромагнитные явления принципа относительности, действовавшего в механике. Истинное же решение проблемы потребовало установления совсем другого принципа относительности. Оно было найдено на совсем другом пути, наиболее характерной особенностью которого было полное сохранение ранее найденных инвариантных относительно преобразований Галилея законов электродинамики.

Этот путь решения проблемы был избран известным голландским физиком-теоретиком Г.А.Лоренцем. Как создатель электронной теории, он, естественно, отстаивал справедливость законов движения электронов, выведенных им из электродинамики Максвелла. Но это потребовало от него героических усилий и мужества на протяжении целого десятилетия. Сохраняя верность своим уравнениям, Лоренц искал объяснение отрицательным результатам опытов по обнаружению движения Земли в эфире за счет вве-

дения дополнительных гипотез, не затрагивающих собственно законы электромагнитных явлений, но оказывающих влияние на окончательный результат обсуждаемых опытов. Такой необычный подход оказался возможным благодаря тому, что ни один физический опыт не является чисто оптическим или электромагнитным, не затрагивающим другие разделы физики. Так, постепенно, ощупью Лоренц пришел к выводам о необходимости внести ряд изменений за пределами самой электродинамики.

Крупнейший математик и физик-теоретик французский ученый А.Пуанкаре неоднократно выступал в поддержку избранного Лоренцем пути решения проблемы. Но он в своем выступлении на международном конгрессе физиков в 1900 году высказал и критическое замечание в адрес этого подхода, указав на опасность нагромождения гипотез, которые всякий раз надо будет выдвигать для объяснения новых опытов. Пуанкаре предлагал искать решение проблемы в полном и строгом выполнении принципа относительности как закона природы, принципиально отрицающего любую возможность наблюдения движения относительно эфира^{/3/}. Это замечание и ценное указание французского ученого оказали непосредственное влияние на весь дальнейший ход теоретических исследований проблемы^{ж)}.

ж) В 1904 году Лоренц написал основную свою работу по теории электромагнитных явлений в движущихся системах. Отмечая справедливость возражения Пуанкаре, он поставил перед собой задачу "с помощью определенных основных допущений показать, что все электромагнитные явления строго, т.е. без какого-либо пренебрежения членами высших порядков, не зависят от движения системы"^{/4, с.68/}.

В полном соответствии с рекомендацией Пуанкаре принять принцип относительности для электромагнитных явлений как строгий закон природы была написана и работа молодого А.Эйнштейна, который, однако, не привел ни одной ссылки на работы своих предшественников^{/5, с.7/}. Как выяснилось позднее, Эйнштейн вместе со своими друзьями изучал в 1903 году книгу Пуанкаре "Наука и гипотеза", в которой целая глава была посвящена относительности движения и в которой приводились радикально новые соображения о времени и одновременности. Отсутствие ссылок на предшествующие работы было позднее объяснено в некоторой степени самим Эйнштейном, считавшим поиски таких ссылок слишком обременительным для себя занятием^{/5, с.54/}.

В работе 1904 года Лоренц остался верен основной линии своего прежнего подхода — сохранить неизменными уравнения электродинамики, инвариантные относительно преобразований Галилея. А выполнение принципа относительности для электромагнитных явлений он стремился достигнуть уже не частными гипотезами, а на основании общего допущения, что полученные для электронов результаты о влиянии поступательного движения на массы и силы следует распространить на частицы и силы любой природы.

Каким же образом эта общая идея, высказанная, кстати, Лоренцем еще в 1903 году^{/6, с. 280/}, обеспечивает строгое выполнение принципа относительности для электромагнитных явлений, причем без явного обращения к новым представлениям о времени и пространстве? Иначе говоря, как идея обобщения полученных для электронов законов может устранить эффекты, связанные с инвариантностью законов электромагнитных явлений относительно преобразований Галилея?

Вся электродинамика движущихся тел Лоренца построена была на предположении, что все электромагнитные явления происходят в одной исходной системе эфира. Лишь в результате отнесения величин, описывающих эти явления, к галилеевским системам отчета, связанным с движущимися относительно эфира телами, возникали определенные отклонения при скоростях движения, соизмеримых со скоростью света. Новая обобщенная гипотеза Лоренца вовсе не устранила эти отклонения, а сделала принципиально невозможным их наблюдение.

Может показаться, что такая точка зрения в корне противоречит традиционной трактовке теории относительности, согласно которой будто бы принципиально отсутствуют какие-либо отклонения в ходе физических процессов в разных инерциальных системах отсчета. Однако это поверхностное заключение не учитывает, что в данном случае речь идет об отнесении явлений к галилеевским системам отсчета с едиными масштабами измерения пространственных и временных интервалов. Поэтому утверждение об отсутствии отклонений в описании электромагнитных явлений в таких системах

отсчета равносильно попытке отвергнуть факт инвариантности этих явлений относительно преобразований Галилея. Полагаю, что после этого разъяснения ничто не мешает нам продолжить обсуждение выдвинутой Лоренцем фундаментальной идеи как необходимого и общего условия ненаблюдаемости отклонений в описании физических явлений в различных галилеевских системах отсчета^{*)}.

Эту основную идею Лоренца теперь мы можем сформулировать в следующем предельно простом виде: оставляя неизменными законы электродинамики, следует сделать в соответствии с принципом относительности принципиально ненаблюдаемыми отклонения, связанные с инвариантностью этих законов относительно преобразований Галилея. Для этого надо предположить, что и все другие физические явления, включая и механические, при больших скоростях движения обнаруживают точно такую же инвариантность относительно преобразований Галилея.

Действительно, возникновение одних и тех же отклонений в описании любых физических явлений делает их принципиально ненаблюдаемыми в данной системе отсчета. Приведенное здесь утверждение об одинаковой инвариантности всех физических законов относительно преобразований Галилея есть всего навсего переформулировка общей гипотезы Лоренца о принятии для сил любой природы и масс любых частиц законов преобразования, установленных для электронов.

Так что, действительно, еще в 1904 году Лоренцем было выяснено, что для устранения проблемы, связанной с неудавшимися попытками обнаружения движения Земли в оптических и электромагнитных опытах, необходимо принять для всех физических явлений общий характер трансформации^{*)} Правда, те, кто крайне догматически следуют традиционной трактовке теории относительности, обычно возражают против самого рассмотрения физических явлений в галилеевских системах отсчета, считая неправильным их использование при больших скоростях движения. Полную необоснованность такого аргумента мы докажем несколько позднее.

их законов для галилеевских систем отсчета при больших скоростях движения.

Конечно, Лоренц был далек от полного понимания найденного решения проблемы, и в его построении фигурировала не просто относительная скорость движения систем отсчета, а абсолютная скорость движения относительно эфира. Ниже мы отдельно обсудим еще недоработку и недооценку в его исследовании пространственно-временного аспекта проблемы, хотя в постановке этого вопроса он и опередил других создателей теории относительности: он ввел понятие "местного" времени в движущейся системе координат и первым получил новые пространственно-временные соотношения, которые затем были положены в основу СТО. Это недопонимание всех аспектов своего творения вполне естественно для первооткрывателя совершенно нового пути в науке, связанного с грандиозным преобразованием основных физических представлений. По поводу новаторских этапов в развитии физики известный американский физик Дайсон писал: "Великое открытие, когда оно только что появляется, почти наверняка возникает в запутанной и бессвязной форме. Самому открывателю оно понятно наполовину. Для всех остальных оно — полная тайна"/7/ *). Для нас более важно сейчас установить несомненный факт глубокого понимания Лоренцем необходимости обобщения на все без исключения физические явления установленных в электродина-

*) К этому справедливому утверждению необходимо сделать следующее добавление: из упомянутых "остальных" вскоре обязательно выделяются отдельные выдающиеся ученые, которые идут дальше первооткрывателя и не только завершают открытие, но придают ему более совершенную форму. И как бы ни был велик вклад последователей, не следует недооценивать значение первооткрывателя, указавшего, хотя и в далеком не завершеном виде, совершенно новый путь в науке. Конечно, самое лучшее, когда сам последователь дает высокую оценку своему предшественнику как подлинному новатору, совершившему переворот в науке. Примером такой высокой морали в научной жизни служат последующие работы Пуанкаре, в которых он не только отмечал приоритет Лоренца, но и приписывал предшественнику свое глубокое понимание проблемы.

мике трансформаций величин при их определении в быстро движущихся галилеевских системах отсчета. И важно это не столько для уточнения истории создания теории относительности, сколько для преодоления в будущем ограниченности утвердившегося ныне понимания этой теории.

Улучшение этого аспекта понимания теории в традиционной трактовке СТО тем более удивительно, что содержащаяся в работе Лоренца идея обобщения установленных законов трансформации на все взаимодействия была сразу же поддержана и развита Пуанкаре. Предложенное Лоренцем преобразование уравнений классической механики за счет введения зависящей от скорости массы он классифицировал как "переворот в наших взглядах на механику", решивший проблему установления единого для всех взаимодействий принципа относительности/8, с.420/. В полном соответствии с таким пониманием проблемы устранения абсолютного движения Пуанкаре еще в 1905 году поставил вопрос об обязательном внесении соответствующих изменений и в закон всемирного тяготения Ньютона/9/. В следующей своей работе он первым получил уравнения релятивистской механики и развил вариант релятивистской теории тяготения, которая удовлетворяла поставленному требованию соответствия электродинамике и релятивистской механике*/9, с.152/. Тем самым Пуанкаре распространил требования новой теории на все известные тогда взаимодействия. Эти вопросы подробно освещены в книге

*) Современная релятивистская теория тяготения, за которой утвердилось название "общая теория относительности" (ОТО), помимо упомянутых в работе Пуанкаре общих свойств движения, составляющих предмет СТО, включает также и те общие свойства движения, которые обусловлены самим тяготением как универсальным взаимодействием, оказывающим влияние на движение всех без исключения материальных объектов.

А.А. Логунова, посвященной анализу двух работ Луанкаре "О динамике электрона" /10/.

Лежащая в основе нового принципа относительности идея обобщения установленных в электродинамике законов трансформации величин на все физические взаимодействия с необходимостью означала последующее распространение релятивистских законов и на те взаимодействия, которые не были известны в период создания теории относительности. В противном случае в исследованиях, затрагивающих новую область физических явлений, возникли бы наблюдаемые эффекты, связанные с абсолютным движением системы отсчета.

Так, значительно позднее в физике возникли представления о сильном и слабом взаимодействиях элементарных частиц. Экспериментальные исследования в этой области принесли новые подтверждения релятивистской теории. При рассеянии быстрых протонов на протонах было обнаружено, что они разлетаются в полном соответствии с предсказанием релятивистской механики под углом, несколько меньшим чем $\frac{\pi}{2}$. Измерение же времен жизни быстрых мезонов показало увеличение их среднего времени жизни со скоростью. Но эти важнейшие факты появления релятивистских эффектов в совершенно новой области физических явлений вовсе не были оценены по достоинству современной физикой. Их просто поставили в общий ряд с другими опытными фактами, доказывающими справедливость СТО, не отметив того, что они относятся к взаимодействиям, о которых ничего не было известно при создании самой релятивистской теории.

Отмеченная недооценка фактов обнаружения релятивистских эффектов в сильных и слабых взаимодействиях является одним из ярких проявлений ограниченности достигнутого понимания релятивистской теории.

Согласно довольно распространенной точке зрения крайнего операционализма в новых экспериментальных фактах вообще ничего нет относящегося к самим взаимодействиям - сильному или слабому, а отклонение угла разлета рассеянных протонов от $\frac{\pi}{2}$ и увеличение времени жизни быстро движущегося мезона есть результат измерений соответствующих величин, специфику которых правильно учитывает СТО.

Но даже для тех, кто не придерживается этой крайней и глубоко ошибочной точки зрения, новые экспериментальные факты прозвучали всего лишь дополнительными подтверждениями правильности открытых в СТО свойств пространства и времени. При этом последние категорично, и не прибегая к операционалистскому обоснованию, все же приписывается статус самостоятельного существования. Такая точка зрения фактически принимала лежащую в основе всей СТО гипотезу об универсальности исходных положений. Но делалось это путем признания первичного статуса свойств пространства и времени, без явного выяснения решающего значения справедливости предположения об инвариантности всех законов физики относительно преобразований Лоренца, подразумевающего существование одной и той же величины предельной скорости передачи взаимодействия любой физической природы.

Вот почему в новых экспериментальных результатах из области сильных и слабых взаимодействий никто из ведущих физиков середины XX века не усмотрел торжества исходного обобщения на все физические взаимодействия положений, взятых из электродинамики. А обобщение это имеет всеобщий характер, не знающий границ, как и в случае закона сохранения энергии. Любое отступление от этого общего положения означало бы возможность обнаружения абсолютного движения в исследованиях соответствующей области новых физических явлений. Так что речь идет о недопонимании центрального момента релятивистской теории, который, как мы уже отмечали, был достаточно ясно представ-

лен в работах Лоренца и Пуанкаре. Причина этого заключается в неправильной расстановке акцентов в трактовке взаимосвязей различных разделов релятивистской теории.

ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Как мы уже отмечали, в работах Лоренца незавершенным оставался метрический аспект проблемы. Его основная идея о приведении всех законов физики в соответствие с электродинамикой, законы которых инвариантны относительно преобразований Галилея, означала, безусловно, существование других пространственно-временных преобразований, выделенных как раз тем, что относительно них инвариантны все законы физики. Однако Лоренц не пришел к этому важному заключению, хотя именно им еще в 1899 году были найдены в окончательном виде новые преобразования пространственно-временных координат^{/II/}, а в работе 1904 года он даже поставил вопрос о доказательстве инвариантности уравнений Максвелла относительно введенных им новых преобразований^{*/4/}. Самым трудным для него оказалось признание физически реальным в новых преобразованиях так называемого "местного" времени в движущейся системе. Он считал его некоторой вспомогательной величиной, а сами новые преобразования — формальным приемом.

Лоренц оставался верен этой точке зрения, несмотря на то, что еще в 1900 году Пуанкаре дал наглядное объяснение физического смысла введенного Лоренцем "местного" времени на основе

*) В работе Лоренца это доказательство было дано лишь для частного случая пустого пространства, в котором отсутствуют электрические заряды и токи. Для общего случая строгое доказательство было дано впервые Пуанкаре в его основной работе /9, с. II8/. Этот важный вопрос истории создания теории относительности подробно разбирается в работе /10, с. 35/.

рассмотрения процедуры синхронизации часов световым сигналом^{*/12/}. Веру в абсолютное время классической физики, надо полагать, могло пошатнуть только ясное представление об инвариантности всех физических законов относительно новых пространственно-временных преобразований.

Однако и примененное Лоренцем рассмотрение физических процессов в "движущейся" системе на основе использования преобразований Галилея могло привести, причем наиболее простым путем, к установлению физического смысла собственной меры времени в этой системе, отличной от меры исходной системы отсчета. Для этого, как будет показано ниже, достаточно было бы обратиться к рассмотрению кинематических характеристик, общих для всех физических процессов. Но этот путь не был пройден ни Лоренцем, ни другими создателями теории относительности, что привело к возникновению определенных педагогических затруднений в объяснении сущности этой теории.

Различные аспекты проблемы пространства и времени СТО были развиты в работах Пуанкаре, Эйнштейна и Минковского. В совокупности эти работы дают достаточно полную картину происшедшего в физике преобразования представлений о времени и пространстве. И все же эта картина не только в педагогическом отношении, но и в плане философского осмысления происшедшего переворота значительно проигрывает без выяснения взаимосвязи между общими кинематическими характеристиками физических процессов и установленными новыми свойствами пространства и времени.

*) В то же время эта интерпретация "местного" времени, данная Пуанкаре в явно операционалистском духе, появилась затем в работе Эйнштейна /5, с. 7/ в том же виде и даже с такими характерными деталями предшествующего изложения, как использование ряда часов вместо понятия собственного времени в каждой точке инерциальной системы. Такое детальное совпадение, скорее всего, объясняется широкой известностью работ Пуанкаре на эту тему.

В своей работе Пуанкаре в первую очередь выделяет новое преобразование пространственно-временных координат как преобразование, "значение которого заключается в объяснении того, почему никакой опыт не в состоянии обнаружить абсолютное движение Земли" /9, с. 122/. Тем самым фигурирующим в преобразовании Лоренца собственному времени и пространственной координате был придан реальный физический смысл. Однако в своем строгом математическом исследовании Пуанкаре больше не повторял прежних своих простых объяснений физического смысла "местного" времени на основе рассмотрения синхронизации часов световым сигналом. В этой работе он впервые подчеркивает, что преобразования пространственно-временных координат обладают свойствами математической группы. При решении проблемы приведения теории тяготения в соответствие с принципами новой механики Пуанкаре впервые ввел четырехмерный подход, который затем получил развитие в работах геттингенского математика Г. Минковского. В целом же работа Пуанкаре оказалась сложна даже для физиков-теоретиков того времени, и она не оказала непосредственного влияния на признание новых концепций времени и пространства.

В этом отношении гораздо большее влияние оказала работа мало известного тогда молодого ученого из Берна А. Эйнштейна. В его работе коренному преобразованию физических представлений о времени и пространстве отводилось центральное место. Новые преобразования пространственно-временных координат выводились непосредственно из принципа относительности и принципа постоянства скорости света. В принятой автором формулировке принципа относительности отмечалась независимость от поступательного движения законов, "по которым изменяются состояния физических систем" /5, с. 10/; но дальнейшее повествование конкретно касалось лишь

электромагнитных законов. В отличие от работ Лоренца и Пуанкаре в работе Эйнштейна в явном виде не ставился вопрос об обобщении полученных результатов на физические законы неэлектромагнитной природы. Однако это серьезное упущение в трактовке релятивистской теории не приводило к прямым противоречиям, поскольку установленные из рассмотрения электромагнитных явлений новые свойства пространства и времени трактовались в обобщенном виде для всех явлений. Но это обобщение достигалось фактически ценой отрыва их от общих свойств движения.

Как мы уже отмечали, сам по себе обобщенный принцип относительности допускает и галилеевскую формулировку, которая противоречит ряду экспериментальных фактов. К установлению следствий, соответствующих лоренцевой форме принципа относительности, Эйнштейн пришел только благодаря второму исходному принципу своего построения — положению о независимости скорости распространения света от движения его источника. Появление этого принципа в работе Эйнштейна весьма необычно, и оно может пролить дополнительный свет на те, уже существовавшие, теоретические представления, которые были использованы автором при написании этой фундаментальной работы*).

* В работе Эйнштейна не приводилось никаких доводов в пользу постоянства скорости света в этом смысле. Оно принималось как естественное и общепринятое положение. Однако таким оно было только в теории электромагнитных волн, основанной на представлении о покоящемся эфире, поскольку в те годы еще не обсуждались астрономические наблюдения, подтверждающие это положение. Лишь позднее (в 1912 году) Эйнштейн дал следующее объяснение причин появления этого принципа в его работе 1905 года: "Чтобы заполнить этот пробел, мы ввели позаимствованный из лоренцевой теории покоящегося светового эфира принцип постоянства скорости света..." /5, с. 219/.

Хотя исходные принципы совпадали с положениями предшествующей работы Лоренца, само теоретическое построение Эйнштейна отличалось прежде всего постановкой обратной задачи. Если Лоренц ставил перед собой задачу определения общих физических требований, необходимых для выполнения обобщенного принципа относительности, то Эйнштейн, приняв этот принцип в качестве исходного положения, ставил перед собой обратную задачу определения всех следствий, с необходимостью вытекающих из принципа относительности и положения о независимости скорости света от движения источника. Полученные таким образом пространственно-временные преобразования сразу же приобретали реальный физический смысл как непосредственный результат выполнения в природе указанных двух принципов. Но кроме формального вывода новых преобразований, в работе Эйнштейна было приведено и наглядное объяснение относительности понятия одновременности для пространственно-разделенных событий на основе рассмотрения мысленного эксперимента по синхронизации часов^{ж)}.

Принципиально новым в работе Эйнштейна было объяснение всех ранее обсуждавшихся релятивистских эффектов. Если по Лоренцу возникновение этих эффектов связывалось с поступательным движением относительно неподвижного эфира и тем самым абсолютное движение фигурировало в объяснении невозможности его наблюдения, то Эйнштейн полностью устранял эфир из теоретической картины электромагнитных явлений. Хотя в самом обозначении он и сохранял

ж) В более ранних работах Пуанкаре не только приводилось это наглядное объяснение физического смысла "местного" времени, но и впервые был дан анализ понятия "одновременность", показана условность критерия одновременности разноместных событий и предложено его определение на основе постулата о независимости скорости света от направления его распространения /9, с. 12/. Однако повторение тех же наглядных объяснений в 1905 году приобрело решающее значение для признания развитых в работе Эйнштейна новых концепций пространства и времени.

принятое ранее разделение систем отсчета на покоящуюся и движущуюся, но покоящаяся система никак не связывалась с эфиром. Поэтому величина скорости, входящая во все ранее установленные соотношения, трактовались уже не как скорость движения системы относительно эфира, а как величина относительной скорости движения двух систем отсчета.

Эту новую точку зрения Эйнштейн в своей работе развил последовательно и исчерпывающим образом, пояснив, что аналогичные релятивистские эффекты возникают и для "покоящейся" системы, если рассматривать ее движение относительно другой системы. Об этой так называемой обратимости релятивистских эффектов в статье была сказана всего одна фраза: "Ясно, что те же результаты получаются для тел, находящихся в покое в "покоящейся" системе, но рассматриваемых из системы, которая равномерно движется" /5, с. 18/. Но именно эта фраза характеризовала другой уровень понимания открытых ранее эффектов теории относительности^{ж)}. Выяснение обратимости релятивистских эффектов было важнейшим этапом понимания новой теории, так как оно с очевидностью показывало всю необоснованность попыток объяснять эти эффекты движением относительно покоящегося эфира.

Правда, в полном устранении самих представлений об эфире не было необходимости. Эйнштейн позднее уточнил, что "теория отно-

ж) В параллельной работе Пуанкаре в её строгих математических выкладках содержалось, конечно, и обратное преобразование группы Лоренца; оно даже непосредственно использовалось в самом выводе преобразований. Однако далеко не всем было понятно, что оно означает взаимную симметрию возникающих релятивистских эффектов. Такое разъяснение Пуанкаре привел только в популярном докладе, прочитанном в Лондонском университете в 1912 году /8, с. 429/.

сительности не требует безусловного отрицания эфира" и что "можно принять существование эфира; не следует только... приписывать ему определенное состояние движения" /5, с. 685/. Эта точка зрения Эйнштейна на эфир уже была близка к взглядам Пуанкаре, который привлекал представление о гипотетической среде для объяснения существования одной и той же предельной скорости для взаимодействий различной природы /9, с.120/.

Итак, основной вклад Эйнштейна в создание СТО состоял в построении стройной теоретической системы на основе ранее обсуждавшихся принципов и в существенном развитии интерпретации новой теории. Именно эти преимущества его работы значительно ускорили признание теории с ее необычными выводами. Однако, высоко оценивая вклад Эйнштейна в развитие нового понимания пространственно-временного аспекта теории относительности, не следует, тем не менее, считать всеобъемлющей созданную им интерпретацию физического содержания теории. Так, в работе Эйнштейна обсуждались лишь относительные величины, и не затрагивался вопрос об инвариантах в новой теории, которые наиболее полно выражают особенности релятивистской теории. Развитие этого аспекта теории в четырехмерном представлении в работах Пуанкаре и Минковского не было только развитием математического формализма теории, но и вошедшим в современные представления более высоким уровнем понимания физического содержания теории. Как было отмечено в работе /2, с.19/, "качественный шаг в объединении пространства и времени в одно целое и введение соответствующей геометрии, по-существу, и есть главное содержание специальной теории относительности".

Однако для уяснения подлинной сущности этого главного содержания теории относительности недостаточно просто исходить из

признания, что все физические процессы протекают в четырехмерном пространстве-времени с необычными свойствами псевдоевклидовой геометрии. Необходимо еще найти исчерпывающий ответ о происхождении этих свойств геометрии физического мира. Но современная трактовка теории относительности не дает удовлетворительного ответа на этот важный для понимания теории вопрос.

Встречающаяся в литературе попытка представить псевдоевклидовую геометрию физического мира результатом определенных измерительных операций субъекта, безусловно, несостоятельна^{*)}. Конечно, мысленное рассмотрение измерительных операций может быть только средством выявления этих свойств измеряемых величин, а не причиной их появления.

Не может быть признана удовлетворительной и тенденция считать релятивистские свойства пространства-времени изначально присущими пустому пространству или даже особой физической среде - вакууму. Исторически такая трактовка теории идет еще от Эйнштейна. Как в первой своей работе, так и в последующих выступлениях на эту тему необычные свойства масштабов и часов трактовались им как самостоятельные сущности в отрыве от общих свойств физических процессов. Этот явный недостаток трактовки теории в полной мере унаследован был и всеми авторами многочисленных монографий, посвященных теории относительности.

*) Наиболее полно такое объяснение релятивистских свойств времени и пространства было развито в лекциях Л.И. Мандельштама /13/, а родоначальниками самого подхода были А. Пуанкаре и А. Эйнштейн.

А между тем Эйнштейн в 1949 году все же отметил этот недостаток принятого им построения теории относительности и признал, что "теорию масштабов и часов следовало бы выводить из решений основных уравнений (учитывая, что эти предметы имеют атомную структуру и движутся), а не считать ее независимой от них" /14/.

Но эта рекомендация более правильного пути установления релятивистских свойств пространства-времени возвращает нас именно к тому подходу, который был начат еще Лоренцем. Как мы уже отмечали выше, на этом пути остался не пройденным важный промежуточный этап получения релятивистских кинематических соотношений в рамках прежних представлений о времени и пространстве. Серьезным препятствием для развития такого подхода стали предвзятое мнение о неприменимости преобразований Галилея в случае относительных скоростей движения систем отсчета, соизмеримых со скоростью света, и недопонимание условной сущности понятия одновременности для разноместных событий. Именно возможность различных соглашений в выборе одновременности позволяет одно и то же физическое содержание релятивистской теории сформулировать в различных представлениях. Сопоставление же таких представлений, различных по форме, но тождественных по физическому содержанию, позволяет выделить то подлинное существо новой теории, которое не зависит от условных соглашений принятой формы представления и поэтому относится к объективным инвариантам теории /15/.

К сожалению, традиционная трактовка теории относительности не включает разъяснений по поводу условного статуса такого понятия, как одновременность событий и вытекающих из этого возможностей различного по форме описания теории, хотя в ряде работ Пуанкаре и Эйнштейна были прямые указания на этот счет /1, с.618-623/.

Особенно четко Пуанкаре сформулировал свою точку зрения по этому вопросу в своем докладе "Пространство и время", прочитанном в мае 1912 года в Лондонском университете. Прежде всего он подчеркнул экспериментальные основания для утверждения в физике принципа относительности в новой форме, соответствующей новой механике. Введение же новых метрических соотношений с необычными свойствами масштабов и часов он отнес к последствиям происшедшего в механике переворота, указав на присутствие в них условного элемента, связанного с определенным выбором одновременности. Свой доклад он закончил утверждением возможности придерживаться и старого соглашения при выборе критерия одновременности событий. Допустимость определенного произвола была им убедительно мотивирована тем, что речь идет об одновременности событий, которые происходят в разных точках пространства и принципиально не могут быть связаны причинно-следственными отношениями.

Но эти высказывания крупнейшего ученого не внесли сомнений в утвердившееся уже представление о первичном статусе свойств пространства и времени в релятивистской теории. А утверждение Пуанкаре о возможности выбора единой одновременности для различных инерциальных систем отсчета стали причислять к заблуждениям ученого.

Произвольность выбора критерия одновременности подчеркивалась также Эйнштейном, а затем рядом других ученых /1, с.618/. Но никто из них не пришел к правильному выводу, что эта произвольность простирается и до возможности выбора единой одновременности, соответствующей преобразованиям Галилея. Этому выводу помешало укоренившееся мнение, что все затруднения классической физики при анализе явлений при больших скоростях движения были связаны с использованием преобразований Галилея.

Вся эта проблема была по-новому освещена в моей статье 1972 года /1/, а также в последние годы в курсе лекций А.А. Логунова, где приводится следующее четкое утверждение: "Часто встречающиеся в литературе утверждения, что в теории относительности необходимо отказаться от преобразований Галилея, просто неверны. Этими преобразованиями, если необходимо, всегда можно пользоваться. Однако, и это главное, они не оставляют уравнения Максвелла-Лоренца инвариантными" /2, с.14/. А воспользоваться этим необходимо, как мы уже отмечали, в первую очередь, для выяснения общих кинематических свойств физических процессов, которые лежат в основе меры-определения в каждой инерциальной системе собственной одно-временности, длительности и протяженности, соответствующих преобразованиям Лоренца.

Правда, группа авторов, выступивших с замечаниями по поводу моей статьи /1/, высказала мнение, что возможность описания релятивистских соотношений с помощью преобразований Галилея является очевидным и общеизвестным фактом /16/. С первой частью этого утверждения нельзя не согласиться. Действительно, в основе такой возможности описания лежат самые простые и вместе с тем фундаментальные соображения об условности понятия одновременности в физическом мире, где отсутствует мгновенная передача действия на конечное расстояние. Что же касается второй части утверждения об общеизвестности этого факта, то она совсем не соответствует действительности. Об этом говорят многочисленные монографии, содержащие прямо противоположные утверждения.*) Но лучшим свидетельством этому являются опубликованные в последние десятилетия в центральных физических журналах предложения так называемых опытов первого порядка, позволяющих будто бы непосредственно, без каких-либо

х) Приведенная нами выше цитата из курса лекций А.А. Логунова /2/ как раз и говорит о часто встречающихся в литературе неверных утверждениях по этому поводу.

условных соглашений, провести сравнение скоростей распространения света в двух противоположных направлениях. При отступлении от постоянства в таких опытах, по утверждению их авторов, должны проявиться эффекты первого порядка. Однако в действительности такие опыты принципиально не могут обнаружить неравенства скоростей света в противоположных направлениях. Все подобные предложения неявным образом базируются на предположении о равенстве скоростей света, что по замыслу авторов в этих опытах должно быть проверено.

Однако в конкретном предложении не всегда просто бывает обнаружить этот неявно представленный момент нарушения всей логики эксперимента. Несостоятельность таких предложений должна быть установлена исходя из таких же общих и фундаментальных соображений, как и в случае предложений осуществить вечный двигатель.

В последней четверти прошлого века физики убедились в бесплодности попыток найти принципиальную схему опыта, которая бы обеспечивала появление эффектов первого порядка величины отношения скорости движения тел к скорости света V/c . Хорошо также известно, что возникшая в начале нашего века СТО дала для всех наблюдаемых величин отличие от аналогичных величин классической физики только во втором порядке отношения V/c . Так что появление в центральных физических журналах *Physical Review*, *Nuovo Cimento*, "Успехи физических наук" предложений опытов первого порядка характеризует утрату понимания современными физиками некоторых общих положений, составляющих фундамент релятивистской физики**).

На необоснованность таких предложений опытов первого порядка было обращено внимание в моей статье /18/. Там же было показано,

*) Некритический обзор предложений опытов первого порядка содержится, например, в работе /17/.

что в основе их лежит непонимание принципиальной невозможности измерения скорости света в одном направлении (без возвращения луча света в обратном направлении), которая означает и невозможность опыта, различающего два описания релятивистской кинематики с использованием преобразований Лоренца и преобразований Галилея. В статье отмечалось также, что начало недоразумению с обсуждением опытов первого порядка положил известный специалист по релятивистской теории К. Мёллер /19/. Ему же принадлежит постановка ложной проблемы экспериментального различения теории Эйнштейна от теории Лоренца. Примечательно, что именно книгу К. Мёллера отмечали авторы замечаний /16/ как пример понимания возможности описания релятивистской теории в галилеевых координатах.

Предложения опытов первого порядка и измерений скорости света в одном направлении и поныне продолжают публиковаться в некоторых физических журналах /20/. Так что до общеизвестности возможности тождественного описания релятивистской кинематики в галилеевых координатах еще далеко, и предстоит большая педагогическая работа по разъяснению всех этих вопросов и в первую очередь - по объяснению определяющей роли общих законов движения.

Следует особо подчеркнуть, что для наглядного выяснения общих свойств физических процессов, определяющих релятивистскую метрику, требуется продолжить лоренцевский подход, использующий преобразования Галилея, но применительно к кинематическому аспекту проблемы. Для того чтобы убедиться, что соответствующие физические процессы^{*)}

*) Под соответствующими физическими процессами в различных инерциальных системах, согласно Лоренцу, подразумеваются аналогичные физические процессы, воспроизведенные в совершенно одинаковых условиях в инерциальных системах отсчета. Например, если в одной системе координат для рассмотрения выбран процесс движения альфа-частиц распада ядер полония, покоящихся в этой системе, то соответствующим процессом в другой системе отсчета будет движение альфа-частиц от распада таких же ядер, но покоящихся относительно этой второй системы координат.

происходят по-разному в различных движущихся относительно друг друга инерциальных системах координат, необходимо прибегнуть к их описанию с использованием одних и тех же единиц измерения пространственных промежутков и временных интервалов с единой одновременностью событий. А этому условию рассмотрения как раз и удовлетворяют преобразования Галилея.

Применив их к релятивистскому миру при больших скоростях относительного движения, мы сможем непосредственно убедиться в том, что только в одной из рассматриваемых систем отсчета /причем произвольно выбираемой/ обеспечивается изотропное описание скоростей физических процессов. Такую систему мы будем далее именовать исходной системой отсчета с координатами x, y, z и t .^{*)}

Для другой же системы координат, движущейся относительно исходной со скоростью v вдоль оси X , описание скоростей соответствующих физических процессов в тех же пространственно-временных масштабах обнаружит явную анизотропию в направлении относительного движения этих систем. Для процесса распространения света такая анизотропия есть непосредственный результат независимости скорости распространения от движения источника света и прямое проявление неинвариантности соответствующего волнового уравнения относительно преобразований Галилея. Для всех других физических процессов, воспроизведенных в этой системе отсчета, возникновение определенной анизотропии скоростей отвечает единственной возможности выполнения

*) Следует отметить, что традиционно используемые для такой системы эпитеты "неподвижная" или "покоящаяся" явно неудачны, так как невозможно объяснить, относительно чего система считается неподвижной. В то же время термин "движущаяся система" для одной из инерциальных систем отсчета вполне пригоден, поскольку он подчеркивает, что рассматривается движение этой системы относительно другой инерциальной системы.

принципа относительности при существовании в природе физического процесса, скорость которого не зависит от движения его источника. Иначе говоря, возникновение анизотропии скоростей произвольного физического процесса при описании их в координатах $\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}$ и \tilde{t} , связанных галилеевыми преобразованиями с координатами исходной системы отсчета ($\tilde{x} = x - Vt, \tilde{y} = y, \tilde{z} = z, \text{ и } \tilde{t} = t$), есть прямое следствие принципа относительности и факта независимости скорости распространения света от движения источника. Широко же распространенное утверждение о несовместимости в рамках галилеевых преобразований двух исходных положений теории относительности просто не соответствует действительности.

Для распространения света в движущейся системе с галилеевыми координатами будем иметь очевидное классическое выражение

$$\tilde{u}_c(\tilde{\theta}) = \left(\frac{d\tilde{x}}{d\tilde{t}}\right)_c = (c^2 - v^2 \sin^2 \tilde{\theta})^{1/2} - v \cos \tilde{\theta}, \quad \text{которое дает величину } c-v \text{ для направления вдоль оси } \tilde{x} \text{ и } c+v \text{ - для противоположного направления.}$$

В случае произвольного физического процесса, происходящего в исходной системе отсчета изотропно со скоростью $U = \frac{dr}{dt} = \text{const}(\theta)$; нужно исходить из условия выполнения принципа относительности в движущейся инерциальной системе отсчета. Для этого необходимо потребовать, чтобы соответствующий физический процесс в движущейся системе с галилеевыми координатами \tilde{x} и \tilde{t} происходил со скоростью

$$u(\tilde{\theta}=0) = U \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \left(1 + \frac{Uv}{c^2}\right)^{-1}$$

- вдоль оси \tilde{x} и со скоростью

$$u(\tilde{\theta}=\pi) = U \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \left(1 - \frac{Uv}{c^2}\right)^{-1}$$

- в противоположном направлении*).

*) Выражение скорости процесса в случае произвольного угла приведено в работе / 1, с 635/.

Именно в силу универсальности этой анизотропии в скоростях физических процессов в движущейся системе имеем те же соотношения между кинематическими характеристиками различных процессов, что и в исходной системе координат для соответствующих физических процессов. Указанная анизотропия скоростей характеризуется величиной разности $\delta\tilde{t} = \Delta\tilde{t}_1 - \Delta\tilde{t}_2$ времен распространения процессов из точки \tilde{x}_1 в точку \tilde{x}_2 ($\Delta\tilde{t}_1 = \frac{\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1}{\tilde{u}(0)}$) и из точки \tilde{x}_2 в точку \tilde{x}_1 ($\Delta\tilde{t}_2 = \frac{\tilde{x}_1 - \tilde{x}_2}{\tilde{u}(\pi)}$), которая не зависит от выбранного физического процесса $\delta\tilde{t} = \text{const}(U)$ *, а также постоянством отношения суммарных времен $\Delta\tilde{t}_1 + \Delta\tilde{t}_2$ для любых выбранных процессов. В силу этих особенностей выполнение принципа относительности в движущейся системе обеспечивается на основе кинематического подобия, (а не тождественности) с процессами, происходящими в исходной инерциальной системе отсчета. (Случай же тождественности описания в галилеевых координатах соответствующих физических процессов в двух рассматриваемых инерциальных системах отсчета отвечает принципу относительности Галилея, находящемуся в явном противоречии с фактом существования в природе физического процесса, скорость распространения которого не зависит от движения его источника.)

Вместе с тем ни в коем случае не следует считать использование преобразований Галилея причиной появления обсуждаемой асимметрии в скоростях произвольного физического процесса в рассматриваемой инерциальной системе координат. Объективный факт как раз и состоит в том, что соответствующие физические процессы происходят в двух инерциальных системах отсчета таким образом, что для них невозможно получить изотропное описание скоростей в обеих системах отсчета, ж) Указанная величина выражается соотношением $\delta\tilde{t} = \Delta\tilde{t}_1 - \Delta\tilde{t}_2 = 2(\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1) \frac{v}{c^2} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$, в которое не входит величина U .

если пользоваться координатами, связанными галилеевыми соотношениями*).

Иначе говоря, обсуждаемая асимметрия скоростей для двух противоположных направлений отражает известный факт универсальной инвариантности физических уравнений относительно преобразований Галилея. Здесь следует подчеркнуть, что это есть единственно возможный вариант нарушений данной инвариантности, согласующийся с принципом относительности.

Имеет также смысл обсудить практическую реализуемость измерений, отвечающих рассмотренному описанию процессов в галилеевых координатах. Авторы замечаний /16/, согласившись с теоретической возможностью описания процессов в галилеевых координатах при релятивистских скоростях, выразили, однако, сомнение в возможности соответствующих измерений в движущейся системе отсчета.

На самом же деле и координата \tilde{x} , и время \tilde{t} , совпадающее с временем t исходной системы, могут быть непосредственно реализованы в движущейся системе координат соответствующим выбором единиц измерения и установкой начальных отсчетов часов. Для этого при синхронизации часов световым сигналом достаточно исходить из другого условного соглашения и считать скорость распространения света равной $C-v$ и $C+v$ соответственно для двух противоположных

* В действительности допустим также и другой выбор координат, связанных галилеевыми преобразованиями $x' = \tilde{x}' - vt'$, $y' = \tilde{y}'$, $z' = \tilde{z}'$ и $t' = \tilde{t}'$, которые обеспечивают изотропное описание скоростей во второй системе отсчета, но приводят, естественно, к асимметричному описанию скоростей соответствующих физических процессов в первой системе. Эта асимметрия скоростей для противоположных направлений вдоль оси X описывается приведенными выше соотношениями, в них только для этого случая следует изменить знак перед величиной v .

направлений. Так что нет никаких оснований для явно противоречивого вывода о том, что теоретически допустимое описание в галилеевых координатах, которому соответствует определенный метрический тензор с отличным от нуля недиагональным членом, будто бы оказывается нереализуемым в измерениях, проводимых в движущейся системе отсчета.

Однако для тех, кто остается в плену этого заблуждения, отметим, что в различии времен прохождения любого физического сигнала в прямом и обратном направлении в движущейся системе отсчета можно убедиться и на основании измерений, проводимых только в исходной системе координат. Для этого требуется лишь измерить по часам исходной системы моменты прохождения сигналов определенных точек движущейся системы в прямом и обратном направлении. В таких измерениях, и не прибегая к использованию преобразований Галилея, мы сможем убедиться, что временной интервал Δt_1 прохождения световым сигналом выбранных точек в направлении движения систем отсчета превосходит на определенную величину δt временной интервал Δt_2 между моментами прохождения световым сигналом тех же точек в обратном направлении. Полученный результат поставит нас перед проблемой его объяснения, согласующегося с принципом относительности. В традиционном изложении СТО фактически уходят от такого объяснения, а само различие измеренных временных интервалов относят к специфике использования часов исходной системы координат. Однако нет никакой необходимости прибегать к страусиной логике и уходить от простейшего объяснения, которому давно пора появиться в школьном курсе. Измеренное различие двух интервалов для светового сигнала только тогда окажется совместимым с принципом относительности, если на ту же величину δt будут отличаться и интервалы прохождения тех же точек и любым другим сигналом, реализованным

на основе использования происходящего в движущейся системе какого-либо физического процесса. Так, если мы таким же образом по часам исходной системы отсчета зарегистрируем моменты прохождения выбранных точек альфа-частицей от распада ядер, находящихся в движущейся системе координат, то найдем ту же величину временного смещения δt , что и для светового сигнала. Таким образом, и в этом случае, не прибегая к использованию галилеевых координат \tilde{x} и \tilde{t} , мы приходим к установлению той же универсальной асимметрии в скоростях физических процессов, воспроизводимых в движущейся системе отсчета.

Важно отдавать себе отчет в том, что обсуждаемая асимметрия в скоростях физических процессов с характерным постоянным временным сдвигом выражает объективный факт относительного различия в ходе аналогичных физических процессов в двух рассматриваемых инерциальных системах отсчета. Это относительное различие в ходе процессов составляет основную особенность релятивистской теории, которая заключается в относительности собственных одновременностей инерциальных систем.

Только в традиционном изложении СТО эту относительность одновременности не совсем правомерно объясняют процессом синхронизации часов световым сигналом. На самом же деле она заключена в универсальном эффекте временного сдвига для всех физических процессов на определенную величину δt . Для установления собственной одновременности событий в каждой инерциальной системе, обеспечивающей изотропное описание скоростей физических процессов в соответствующей системе отсчета, пригоден, конечно, любой физический процесс в качестве синхронизирующего сигнала. Сама же синхронизация часов проводится с использованием условного соглашения о равенстве скоростей выбранного процесса для любых направлений. Далее для определения соотношения между установленными таким образом собственными

одновременностями в двух инерциальных системах требуется лишь знание величины временного сдвига δt , полученного с использованием галилеевых координат с характерной для них единой одновременностью для двух систем отсчета. Последняя величина не зависит от вида физического процесса, и лишь исторически ее вычисляли при рассмотрении распространения света (когда $U = c$).

Однако и уяснив возможность синхронизации часов любым физическим процессом, не следует забывать, что речь идет об установлении таким образом одной из возможных в каждой системе отсчета одновременностей, которую для определенности мы называем собственной. Пренебрежение же этим обстоятельством, как правильно было отмечено в работе /2, с.26/, "внесло путаницу в понимание сущности теории относительности, особенно в выделении в ней главного и второстепенного" /2, с.26/.

Вместе с собственной одновременностью в каждой инерциальной системе устанавливаются соответствующие меры для количественных измерений пространственных протяженностей и временных длительностей. Тем самым каждому событию, происходящему в физическом мире, могут быть сопоставлены собственные пространственно-временные координаты в различных инерциальных системах. Преобразования Лоренца как раз и выражают однозначную связь между такими собственными координатами одного события в двух инерциальных системах.

Использование собственных пространственно-временных координат по определению обеспечивает изотропное описание скоростей физических процессов в заданной инерциальной системе. Так, переход в движущейся системе от координат $\tilde{x} = x - vt$, $\tilde{y} = y$, $\tilde{z} = z$, $\tilde{t} = t$ к собственным координатам $x' = (x - vt)(1 - \frac{v^2}{c^2})^{-\frac{1}{2}}$, $y' = y$, $z' = z$ и $t' = (t - \frac{v}{c^2}x)(1 - \frac{v^2}{c^2})^{-\frac{1}{2}}$ дает уже изотропное описание скоростей тех же физических процессов в данной инерциальной системе.

Но это обстоятельство вовсе не означает исчезновения ранее обсуждавшегося относительного различия в ходе соответствующих физических процессов для двух рассматриваемых инерциальных систем. В силу всеобщности это различие оказалось возможным выразить в свойствах несовпадающих собственных времен этих двух инерциальных систем отсчета.

Поэтому совершенно неправомерно полученную за счет использования собственных координат тождественность описаний соответствующих физических процессов интерпретировать как одинаковое протекание этих процессов в различных инерциальных системах и тем самым маскировать факт выполнения принципа относительности на основе осуществления кинематического подобия. Очевидно, что совпадение кинематических описаний в этом случае достигнуто за счёт использования не совпадающих между собой метрических систем измерения. Поэтому совпадение кинематических характеристик в этих описаниях означает лишь эквивалентность, а не равенство соответствующих физических величин в разных системах отсчёта. Так, получение одинаковых значений скоростей соответствующих физических процессов в разных инерциальных системах вовсе не означает их равенства, поскольку эти величины выражаются отношением пространственных промежутков к временным интервалам, измеренных в эквивалентных, но не совпадающих между собой единицах.

По этой причине постоянство скорости света, утверждаемое в СТО, не имеет никакого отношения к сопоставлению скоростей этого процесса в разных системах отсчёта. Оно означает лишь неизменность отношения скоростей света к скоростям других физических процессов, воспроизведённых в одинаковых условиях в различных инерциальных системах.

Связь между нетождественными собственными временами t и t' двух инерциальных систем отсчета, устанавливаемая преобразованиями Лоренца, как раз и характеризует осуществляющееся в природе всеобщее различие в ходе соответствующих физических процессов в рассматриваемых системах. Никакого другого физического смысла нельзя приписать нетождественности собственных времен различных инерциальных систем. Как мы уже отмечали ранее, "ни сами понятия пространства и времени, ни количественные характеристики протяженности и длительности не представляют собой самостоятельной реальности, существующей наряду с материей или в качестве фактора, определяющего свойства движения материи. Эти понятия служат лишь для выражения общих свойств движения материи" / I, с. 654 /. Поэтому выделяемые из всего многообразия физической реальности масштабы и часы наделяются лишь теми свойствами, которые являются общими для всех без исключения физических процессов. Отсюда и проистекает универсальность тех свойств физических явлений, которыми обусловлена релятивистская метрика.

Мы показали, что эти общие свойства движения могут быть явно выделены при описании кинематических характеристик физических процессов на основе использования преобразований Галилея. При этом сами выделенные свойства остались, конечно, вне группы Галилея. Но те же свойства движения в силу их общности органически вошли в релятивистские метрические соотношения. В соответствии с этим группа Лоренца оказывается выделена физическим миром, в котором все законы инвариантны относительно преобразований Лоренца. Именно эта выделенность дает все основания считать входящие в группу Лоренца собственные величины физическим временем и физическим расстоянием в соответствующей инерциальной системе координат*.)

*) Что же касается использованных в предварительном рассмотрении галилеевых координат \bar{x} и \bar{t} , то они по терминологии, введенной в работе / 2, с. 153 /, должны быть отнесены к классу координатных величин.

Использованные для собственных величин меры длительности и протяженности соответствуют природным эталонам длительности и протяженности в каждой инерциальной системе ^{ж)}. Эта особенность, как справедливо было отмечено М. Борном, поднимает релятивистскую метрику "выше уровня простой условности" / 2I, с. 305 /.

Таким образом, для релятивистской метрики характерно использование в каждой инерциальной системе отсчета своего пространственно-временного базиса с физически эквивалентными единицами измерения длительности и протяженности и с не совпадающими между собой критериями одновременности разноместных событий. Поэтому все величины, измеренные в одной системе координат, при переводе их в другую систему пересчитываются с учетом различия пространственно-временных базисов этих систем. С этим пересчетом и связано отличие релятивистской формулы сложения скоростей от классической формулы простого суммирования скоростей ^{жж)}. Иначе говоря, особенность релятивистского сложения скоростей — той же самой природы, что и особенность вычисления суммарного расстояния в том случае, когда одна его часть измерена в морских, а другая — в сухопутных милях.

Выражаемое преобразованиями Лоренца различие в ходе всех физических процессов в направлении относительного движения двух инерциальных систем замечательно тем, что оно не нарушает физического равноправия этих систем. Так, все процессы в направлении относительного движения инерциальных систем идут в одной из рассматриваемых систем медленнее, чем в другой, однако для противоположного направ-

^{ж)} По этой причине эквивалентными единицами измерения длины в каждой системе могут быть выбраны, например, постоянная решетки кристаллов определенного минерала, которые берутся покоящимися в соответствующих системах. Аналогично эталон длительности может быть связан с частотой определенной спектральной линии атомов определенного элемента, которые берутся покоящимися в системах.

^{жж)} Релятивистский закон сложения скоростей первоначально был формулирован Дж. Лармором /1900 г./ в виде пересчета величины $U' = \frac{dx'}{dt'} = U = \frac{dx}{dt}$ в величину $\tilde{U} = \frac{dx}{dt} = U \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \frac{v}{c^2} \left(1 + \frac{Uv}{c^2}\right)^{-1}$.

ления осуществляется обратная ситуация. Это утверждение, констатируя действительное соотношение между скоростями физических процессов, не зависит от каких-либо условных соглашений.

Часто приводимое для демонстрации установленных в СТО необычных свойств времени утверждение типа: "движущиеся часы идут медленнее неподвижных" — отличается нечеткостью формулировки и явным несоответствием всему духу установленного теории относительности полного равноправия инерциальных систем. На самом же деле в эффекте релятивистского замедления времени речь всегда идет о несимметричном сопоставлении часов разных систем отсчета, когда собственное время в одной точке определенной системы координат сравнивается с собственными временами в разных точках другой инерциальной системы координат. Такое сопоставление основано всегда на использовании условной собственной одновременности одной из рассматриваемых инерциальных систем, в которой соответствующий интервал времени отсчитывается по показаниям двух часов, расположенных в разных точках этой системы координат. Так что в приведенной выше неудачной формулировке под неподвижными часами подразумевается на самом деле пара синхронизованных часов одной из систем отсчета ^{ж)}.

О РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ДИНАМИКЕ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

В настоящем докладе мы ограничились рассмотрением кинематического аспекта СТО как непосредственно связанного с релятивистской метрикой. Но возникновению рассмотренных кинематических соотношений предшествует, конечно, соответствующий динамический процесс ускоренных движений. Тот факт, что обобщенный на все физические явления

^{ж)} Подробно этот вопрос обсуждался нами в работе / I, с. 646/. Здесь же мы ограничимся констатацией того факта, что в СТО принципиально исключается возможность непосредственного сравнения интервалов собственных времен, взятых в одной точке каждой инерциальной системы. Такое сопоставление невозможно по тем же причинам, что и безусловное измерение скорости света в одном направлении.

принцип относительности может быть сформулирован и непосредственно согласован с кинематическим описанием релятивистского мира, проведенным в рамках классических представлений о времени и пространстве, означает, что и сама релятивистская динамика процессов обязательно допускает формулировку в рамках того же подхода, использующего галилеевы координаты. Можно показать, что для этого достаточно лишь отказаться от постоянства инерциальной массы классической механики и ввести для этой величины соответствующий универсальный закон возрастания с увеличением относительной скорости ускоряемого объекта. Модернизированная таким образом классическая механика непосредственно приводит к тем же самым рассмотренным нами кинематическим соотношениям релятивистского мира, представленным в галилеевых координатах.

Такая возможность распространения релятивизма на механические явления без непосредственного привлечения новых представлений о времени и пространстве показывает, что релятивистское обобщение механики может быть проведено в рамках самой классической механики без отказа от её основных принципов путем простого изменения динамического закона ускорения тел. Этому выводу следует отвести должное место в преподавании механики при обсуждении её релятивистского обобщения.

Кроме того, указанная возможность получения релятивистских кинематических соотношений, представляющих сущность релятивистских свойств пространства и времени, на основе учёта основной особенности динамического процесса подчёркивает первичный статус механики как определяющего начала в возникновении этих общих свойств движения.

Требуемый для релятивистского обобщения механики закон изменения инерциальной массы совпадает, конечно, с законом, полученным Лоренцем в электродинамике для электронов. Безусловно, имеется возможность построения всей релятивистской теории на основе исходной по-

сылки об универсальной зависимости массы от скорости относительного движения для всех физических объектов. В свою очередь, основанием для такой единой динамики может стать допущение о существовании в природе единой для всех физических явлений предельной скорости передачи взаимодействия в пространстве.

В заключение отметим, что теоретические вопросы релятивистской механики наиболее подробно рассмотрены в работе /2/, в которой даны также разъяснения по довольно запутанному в литературе вопросу о правомерности рассмотрения в СТО свойств ускоряемых тел и соответствующих им систем отсчёта.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ

Изложенные выше аргументы позволяют сделать следующие выводы по вопросам преподавания классической механики и релятивистской теории :

1. Релятивистская механика явилась естественным завершением классической механики, её обобщением на основе учета всеобщего закона возрастания инерциальной массы физических объектов с увеличением скорости относительного движения. В основе всеобщности закона изменения массы лежит существование в природе единой предельной скорости для всех взаимодействий.

2. Отступление от законов классической механики при больших скоростях движения приводит к нарушению галилеевой формы принципа относительности, утверждавшего тождественность кинематических соотношений, возникающих в различных движущихся относительно друг друга инерциальных системах отсчета. Эти отступления выражаются в неинвариантности законов механики относительно преобразований Галилея, отклонения от требований которой имеют всеобщий характер для всех физических явлений. В результате этого в природе осуществляется принцип относительности на основе кинематического подобия

физических процессов, воспроизводимых в эквивалентных условиях относительно различных инерциальных систем.

3. Факт относительного различия в ходе соответствующих процессов в движущихся относительно друг друга инерциальных системах приводит к несовпадающим собственным одновременностям в этих системах. Для разъяснения сущности этого согласующегося с принципом относительности различия в ходе физических процессов целесообразно в одной из инерциальных систем рассмотреть описание скоростей физических процессов, использующее формально вводимые пространственно-временные координаты, которые связаны с координатами другой инерциальной системы преобразованиями Галилея. Такой подход позволяет показать, что относительность одновременности состоит в том, что все физические процессы в направлении относительного движения систем происходят в одной системе медленнее, чем в другой и, соответственно, быстрее в противоположном направлении.

4. Самими законами физики, их инвариантностью относительно преобразований Лоренца предопределена псевдоевклидова структура геометрии пространства-времени физического мира.

Распространение релятивистских законов на механические явления входит в число исходных посылок, определяющих выделенность группы Лоренца в физическом мире.

Эти положения противопоставляются обычной схеме представления релятивистской механики следствием релятивистской метрики, возникновение которой, в свою очередь, связывают с распространением принципа относительности механики на электродинамику. Возражения против такого подхода достаточно полно изложены в самом докладе.

х х

х

Автор отдает себе отчет в трудностях восприятия старых истин в новом изложении. Поэтому в докладе большое внимание было уделено

доказательству связи представленного толкования теории со многими уже забытыми идеями первых создателей основ релятивистской теории и отдельными положениями нового рассмотрения проблемы, проведенного А.А. Логуновым, которому автор искренне благодарен за постоянный интерес и полезные обсуждения. Автор признателен также Оргкомитету Всесоюзного совещания "Основы классической механики и их роль в преподавании механики" за приглашение выступить с настоящим докладом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Типкин А.А. УФН, 1972, т. 106, с. 617.
2. Логунов А.А. Лекции по теории относительности. Современный анализ проблемы. Изд-во МГУ, М., 1984.
3. Poincare H. Rapports du Congres de physique de 1900, Paris, v. 1, p. 22.
4. Лоренц Г.А. В Сб.: Принцип относительности. 1973, М., "Атомиздат", с.67-87.
5. Эйнштейн А. Собр. научн. трудов, т. I, М., "Наука", 1965.
6. Lorentz H.A. Weiterbildung der Maxwell'schen Theorie. Electrodynamtheorie. Mathematische Encyklopadie, b. 14, s.277-280.
7. Дайсон Фр. Дж. Новаторство в физике. В сб.: Элементарные частицы. М., Физматгиз, 1963, вып. 2, с. 103.
8. Пуанкаре А. О науке. М., "Наука", 1983.
9. Пуанкаре А. В сб.: Принцип относительности. 1973, М., "Атомиздат", с. 90-93, 118-161.
10. Логунов А.А. К работам Анри Пуанкаре "О динамике электрона", Изд-во МГУ, М., 1984.
11. Lorentz H.A. Zittingsverlag, Acad. Wet., 1899, v. 7, s. 507; Amsterdam Proc., 1898-1899, p. 427.
12. Poincare H. Archives Neeland, 1900, v. V, p. 252.
13. Мандельштам Л.И. Полное собрание трудов., т. 5, М., Изд-во АН СССР, 1950.
14. Эйнштейн А. Собр. научн. трудов. т. 4, М., "Наука", 1967, с. 280.

15. Тяпкин А.А. Вопросы философии, 1970, № 7, с. 64.
16. Кадомцев Б.Б., Келдыш Л.В., Кобзарев Н.Ю., Сагдеев Р.З. УФН, 1972, т. 106, с. 660.
17. Страховский Г.М., Успенский А.В., УФН, 1965, т. 86, с. 421.
18. Tyapkin A.A. Lett. Nuovo Cimento, 1973, v.7, p.760.
19. Moller C. Suppl. Nuovo Cimento, 1957, v. 6, p. 381.
20. Byl J. Sanderse M. and van der Kamp W. Am. Journ. of Phys. 1985, v. 53, p.43.
21. Борн М. Эйнштейновская теория относительности./перераб. изд./ М., "Мир", 1964.
22. Лармор Дж. В сб.: Принципы относительности. 1973, М., "Атомиздат", с.61.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 августа 1985 года

Тяпкин А.А.

P2-85-627

Новый подход в преподавании основ релятивистской механики

Обсуждается новый подход в преподавании релятивистской механики, целью которого является установление более глубокого понимания сущности специальной теории относительности. Новизна подхода в методическом отношении состоит в применении галилеевых координат для описания скоростей различных физических процессов, воспроизведенных в эквивалентных физических условиях в движущихся относительно друг друга инерциальных системах. В результате рассмотрения выясняется общий характер отклонений физических законов от инвариантности относительно преобразований Галилея, которые проявляются в общих относительных изменениях скоростей всех физических процессов, происходящих с сохранением кинематического подобия. С этими изменениями скоростей в направлении относительного движения систем отсчета и связано установленное теорией относительности различие одновременностей в движущихся инерциальных системах. Показана связь такого толкования теории с идеями Пуанкаре и Лоренца - создателей основ релятивистской теории.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С. Виноградовой

Tyapkin A.A.

P2-85-627

A New Approach to Teaching the Fundamentals of the Relativity Mechanics

A new approach to teaching the fundamentals of relativistic mechanics is discussed. The aim is to achieve deeper understanding of the special theory. The methodic innovation is that the Galilean coordinates are used to describe rates of the physical processes represented under equivalent physical conditions in inertial systems which move regarding one another. Such consideration reveals general features in deviations of physical laws from the invariance in respect of the Galilean transformations. Those deviations manifest themselves in general relative changes of the rates of all physical processes, occurring with preservation of kinematic likelihood. Those changes of rates of processes in the direction of relative movement of a reference system are related to the difference of eigensimultaneities in different inertial systems of reference, as established in the relativity theory. This interpretation of the relativity theory is shown to be related to ideas of Poincaré and Lorentz who developed the fundamentals of the relativity theory.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985