А. Эйнштейн

О специальной и общей теории относительности

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 53
ББК 22.3
А11

А. Эйнштейн

А11 О специальной и общей теории относительности / А. Эйнштейн – М.: Книга по Требованию, 2012. – 79 с.

ISBN 978-5-458-25387-1

Настоящая брошюра должна облегчить возможно более точное ознакомление с теорией относительности для тех, кто интересуется теорией с общенаучной, философской точки зрения, но не владеет математическим аппаратом теоретической физики. Чтение брошюры предполагает у читателя познания в объеме средней школы, и кроме того, несмотря на ее краткость, достаточно терпения и настойчивости. Автор приложил особое старание к тому, чтобы с возможно большей простотой и отчетливостью изложить руководящие идеи теории, придерживаясь в целом той их последовательности и связи, в какой они возникли в действительности. В интересах ясности я не останавливался пред частыми повторениями, нисколько не считаясь с изяществом изложения, Я добросовестно следовал предписанию гениального теоретика Л. Больцмана, рекомендовавшего заботу об изяществе предоставить портным и башмачникам. В своем изложении я не обошел, думается мне, тех трудностей, которые лежат в самой природе вопроса, но зато я сознательно сурово отнесся к эмпирико-физическим основаниям теории, дабы уберечь читателя, мало осведомленного в физике, от участи того путника, который из-за деревьев не видел леса. Пусть же эта небольшая книжка доставит не одному человеку несколько радостных часов умственного возбуждения.

ISBN 978-5-458-25387-1

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

Серия Книжный Ренессанс
www.samizday.ru/reprint

ПРЕДИСЛОВИЕ.

Настоящая брошюра должна облегчить возможно более точное ознакомление с теорией относительности для тех, кто интересуется теорией с общенаучной, философской точки зрения, но не владеет математическим аппаратом [1]) теоретической физики. Чтение брошюры предполагает у читателя познания в объеме средней школы, и кроме того, несмотря на ее краткость, достаточно терпения и настойчивости. Автор приложил особое старание к тому, чтобы с возможно большей простотой и отчетливостью изложить руководящие идеи теории, придерживаясь в целом той их последовательности и связи, в какой они возникли в действительности. В интересах ясности я не останавливался пред частыми повторениями, нисколько не считаясь с изяществом изложения. Я добросовестно сле-

---

[1]) Изложение математических основ специальной теории относительности можно найти в оригинальных работах А. Лоренца, А. Эйнштейна и Г. Минковского, вышедших под заглавием «Принцип относительности» в издаваемом B. G. Teubner'ом собрании монографий «Успехи математических наук», а также в обстоятельной книге М. Лауэ «Принцип относительности» (изд. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig). Что касается общей теории относительности с необходимыми для нее вспомогательными математическими частями теории инвариантов, то ей посвящена брошюра автора «Основы общей теории относительности» (Joh. Ambr. Barth, 1916). Брошюра эта требует некоторого знакомства со специальной теорией относительности.

довал предписанию гениального теоретика Л. Больцмана, рекомендовавшего заботу об изяществе предоставить портным и башмачникам. В своем изложении я не обошел, думается мне, тех трудностей, которые лежат в самой природе вопроса, но зато я сознательно сурово отнесся к эмпирико-физическим основаниям теории, дабы уберечь читателя, мало осведомленного в физике, от участи того путника, который из-за деревьев не видел леса. Пусть же эта небольшая книжка доставит не одному человеку несколько радостных часов умственного возбуждения.

А. Эйнштейн.

Декабрь 1916 г.

Дополнению к третьему изданию.

В этом году (1918) издательством Шпрингера выпущен подробный, превосходно составленный Вейлем учебник общей теории относительности под заглавием «Пространство. Время. Материя», который может быть горячо рекомендован математикам и физикам.

ПЕРВАЯ ЧАСТЬ.

О специальной теории относительности.

1. Физическое содержание геометрических теорем.

Конечно, и тебе, милый читатель или читательница, пришлось в школьные годы познакомиться с гордым зданием Эвклидовой геометрии, и, быть может, ты и сейчас вспоминаешь больше с уважением, чем с любовью, это гордое строение, по высоким лестницам которого в бесчисленные часы гоняли тебя твои добросовестные преподаватели. И, конечно, эти воспоминания побудят тебя покарать своим презрением каждого, кто объявил бы неверной хотя бы ничтожнейшую из теоремок этой науки. Но, быть может, чувство гордой уверенности покинет тебя тотчас, как кто-либо предложит тебе вопрос: «А что собственно хочешь ты сказать своим утверждением, что эти теоремы истинны?». На этом вопросе мы несколько остановимся.

Геометрия исходит из определенных основных понятий, как плоскость, точка, прямая, с которыми мы в состоянии связать более или менее отчетливые представления, и некоторых простых предложений (аксиом), которые мы, на основе этих представлений, склонны принять, как «истинные». Затем, все остальные предложения путем логического метода, законность которого мы чувствуем себя вынужденными признать, приводятся к этим аксиомам, т.-е. доказываются. Предложение тогда является правильным, или «истинным», когда оно выведено из аксиом по определенному, признанному методу. Вопрос об «истинности» отдельных геометрических предложений приводит таким образом к вопросу об «истинности» аксиом. Однако, давно уже известно, что на последний вопрос не только не может быть дан ответ методами геометрии, но что и вообще он сам по себе лишен смысла. Нельзя спросить, верно ли, что через две точки можно провести только одну прямую. Можно только сказать, что Эвклидова геометрия трактует о таких образованиях, которые она называет «прямой» и которым она придает свойство быть однозначно определенными двумя своими точками. Понятие «истинный» неприложимо к высказываниям чистой геометрии, потому что словом «истинный» мы в конечном счете постоянно характеризуем согласование с «реальным» предметом; но геометрия не занимается отношением своих понятий к предметам опыта, она имеет дело только с логической связью этих понятий между собой.

Наша склонность характеризовать тем не менее геометрические предложения, как истинные, легко объяснима. Геометрическим понятиям соответствуют с большей или меньшей точностью вещи в натуре, каковые, без сомнения, и были единственной причиной для образования этих понятий. Пусть геометрия отказывается от этого соответствия для того, чтобы придать своему зданию возможно бо̀льшую логическую законченность; все же привычка считать, например, два отмеченных на отрезке пункта лежащими на практически твердом теле—глубоко заложена в навыках нашего мышления. Мы привыкли далее принимать, что три места находятся на одной прямой, если при наблюдении их одним глазом из соответственным образом выбранного пункта нам кажется, что они совпадают.

Если мы теперь, следуя навыкам нашего мышления, добавим к положениям Эвклидовой геометрии еще одно только положение, что двум точкам практически твердого тела постоянно соответствует то же самое расстояние (один и тот же отрезок), как бы мы ни изменяли положение тела, то из положений Эвклидовой геометрии получатся положения о возможном относительном расположении практически твердых тел [1]). Дополненная таким образом геометрия должна быть рассматриваема, как отрасль физики. Теперь по праву может быть поставлен вопрос об «истинности» таким образом истолкованных геометрических положений, так как можно спросить, оправдаются ли они на тех реальных вещах, которые мы сочетаем с геометрическими понятиями. Несколько неточно это можно выразить таким образом: под «истинностью» геометрического положения в указанном смысле мы разумеем подтверждение его при построениях с помощью циркуля и линейки.

Убеждение в истинности геометрических положений в указанном смысле покоится, естественно, исключительно на весьма несовершенных опытах. Сначала мы будем исходить из предположения об истинности геометрических положений, но затем в последней

---

[1]) С тем вместе и понятие прямой линии получает соответствующий объект в мире вещей. Три точки твердого тела A, B и C тогда лежат на одной прямой, когда при определенном месте точек A и C точка B расположена таким образом, что сумма расстояний AB и BC будет возможно наименьшая. Это отрывочное указание все же достаточно для нашего рассуждения

части наших рассуждений (при рассмотрении общей теории относительности) мы увидим, что эта истинность имеет свои пределы, и рассмотрим, в чем последние заключаются.

II. Система координат.

На основе указанного физического истолкования расстояния мы получаем возможность установить расстояние двух точек твердого тела путем измерений. Для этого мы употребляем раз навсегда принятый отрезок (мерку S) в качестве единичного масштаба. Если даны две точки твердого тела A и B, то соединяющую их прямую можно построить по законам геометрии; затем на этой прямой от точки A откладывают отрезок S столько раз, чтобы он достигнул точки B. Число откладываний и дает числовое измерение расстояния AB. На этом основано всякое измерение длины [1]).

Всякое пространственное обозначение какого-либо события или предмета основано на том, что указывается точка определенного твердого тела (исходного тела), с которой это событие совпадает. Это имеет место не только в научных обозначениях, но и в повседневной жизни. Если я проанализирую определение места: «в Берлине, на Потсдамской площади», то это означает следующее. Поверхность земли есть твердое тело, к которому относится указанное место; «Потсдамская площадь в Берлине», это—отмеченная на нем, снабженная именем точка, с которой пространственно совпадает событие [2]).

Этот примитивный способ указания места пригоден только для поверхности твердых тел и связан с наличием различаемых точек на этой поверхности. Посмотрим ближе, как человеческий ум освобождается от обоих этих ограничений, не изменяя существа обозначения места. Предположим, например, что над Потсдамской площадью парит облако; тогда место его в отношении земной поверхности может быть установлено тем, что на площади отвесно воздвигается шест, достигающий облака. Длина шеста, измеренная

---

[1]) Здесь, разумеется, подразумевается, что измерение совершается без остатка т.-е. дает целое число. Затруднение легко устранить применением разделенного масштаба, что не содержит в себе никакого принципиально нового метода.

[2]) В более подробном исследовании того, что здесь означает «пространственное совпадение», пока нет необходимости, так как это понятие постольку ясно поскольку в отдельном реальном случае едва ли могли бы иметь место разногласия относительно наличности такого совпадения.

принятой за единицу меркой, вместе с указанием места основания шеста, даст полное определение места облака. На этом примере мы видим, каким путем усовершенствован способ определения места.

а) Твердое тело, к которому относятся обозначения места, мы расширяем таким образом, чтобы оно достигло предмета, место коего подлежит определению.

б) Место определяется числом, вместо названия отмеченных точек (в нашем примере—числом, выражающим длину шеста в принятой за единицу мере).

в) О высоте облака говорят и тогда, когда достигающий его шест вовсе и не воздвигнут. Путем оптического восприятия облака с различных мест земли можно определить, на основании свойств распространения света, как велика должна была бы быть длина шеста, чтобы он мог достигнуть облака.

Из этих рассуждений видно, что для определения места лучший способ, это—не зависеть от наличия на твердом теле, принимаемом за исходное, отмеченных и снабженных именем точек, а применять числа. Измерительная физика достигает этого путем применения Декартовой системы координат.

Последняя состоит из трех взаимно перпендикулярных твердых, плоских стен, связанных с твердым телом. Описание места какого-либо события заключается (в существенных чертах) в указании длины трех перпендикуляров или координат x, y, z (см. рис. 2), которые могут быть из него опущены на три плоских стенки системы. Длины этих трех перпендикуляров могут быть получены путем ряда манипуляций с твердыми мерками, совершаемых согласно предписаниям законов и методов Эвклидовой геометрии.

На практике большей частью реально не применяются эти твердые стенки, образующие систему координат. Равным образом и координаты отыскиваются не путем действительных построений с помощью твердых реек, а косвенно. Тем не менее физический смысл обозначений места всегда должен быть понимаем в согласии с только что изложенными разъяснениями, так как иначе данные физики и астрономии расплылись бы в полной неопределенности [1]).

Итак, отсюда следует: всякое пространственное описание событий исходит от твердого тела, к которому события должны быть пространственно относимы. Эти пространственные отношения предполагают, что для «отрезков» имеют силу законы Эвклидовой геометрии, при чем такой «отрезок» физически представлен двумя отмеченными точками на твердом теле.

---

[1]) Только разбираемая во второй части книжки общая теория относительности сделает необходимым иное, более совершенное понимание этого вопроса.

III. Пространство и время в классической механике.

Если я, без особого раздумья и не вдаваясь в подробные разъяснения, формулирую задачу механики таким образом: «механика имеет своей задачей описать, как с течением времени тела меняют свое место в пространстве», то я рискую взять на свою душу несколько смертных грехов против святого духа ясности. Прежде всего надо вскрыть, в чем эти грехи заключаются.

Не ясно, что́ здесь должно разуметь под «местом» и «пространством». Я стою у окна равномерно движущегося вагона железной дороги и роняю на полотно дороги камень, не давая ему никакого толчка. Тогда я вижу (не принимая в расчет влияния, оказываемого сопротивлением воздуха), что камень падает прямолинейно. Пешеход, который наблюдает мое действие со своей тропинки, замечает, что камень падает на землю, описывая дугу параболы. Теперь я спрашиваю: где «в действительности» лежат «места», которые пробегает камень на прямой или на параболе? Далее: что означает здесь движение «в пространстве»? Ответ с точки зрения выводов § 2 ясен сам собой. Прежде всего оставим совершенно в стороне темное слово «пространство», в которое, если честно признаться, мы не можем вложить ни малейшего осмысленного содержания; движение в «пространстве» мы заменим «движением в отношении к какому-либо практически твердому исходному телу». Определение места в отношении к исходному телу (вагон или поверхность земли) уже подробно установлено в предыдущем параграфе. Заменяя «исходное тело» полезным для математических описаний понятием «системы координат», мы можем сказать: в отношении к системе координат, твердо соединенной с вагоном, камень описывает прямую; в отношении же к системе координат, твердо соединенной с поверхностью земли, камень описывает параболу. На этом примере ясно можно видеть, что кривой пробега [1]) самой по себе не существует, но есть лишь кривая пробега в отношении к определенному исходному телу.

Но для полного описания движения требуется еще, чтобы было указано, как тело меняет свое место в течение времени. Это значит, что для каждой точки кривой пробега должно быть обозначено, в какое время тело там находится. Эти данные должны быть дополнены еще таким определением времени, в силу которого обозначаемые промежутки времени могли быть рассматриваемы, как принципиально доступные наблюдению величины (результаты измерений). Стоя на почве классической механики,

---

[1]) Т.-е. кривой, по которой движется тело.

мы в нашем примере удовлетворим этому требованию следующим образом. Мы представим себе двое совершенно одинаково сделанных часов; одни из них держит человек, стоящий у окна вагона, а другие—человек на тропинке. Каждый из них замечает, в каком именно месте соответствующего исходного тела находится камень в момент тиканья часов, которые он держит в руке. Здесь мы не входим в рассмотрение той неточности, которая происходит от того, что распространение света имеет определенную конечную скорость. Об этом, а также и о другой возникающей здесь трудности, подробно речь будет позже.

IV. Галилеева система координат.

Основной закон Галилее-Ньютоновой механики, известной под именем закона инерции, гласит, как известно, следующее: «тело, достаточно удаленное от других тел, пребывает в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения». Это положение не только говорит нечто о движении тел, но и дает некоторые указания относительно допустимых в механике исходных тел или систем координат, которые могут быть применяемы при механических описаниях.

Тела, относительно которых закон инерции применим со значительным приближением, это — видимые неподвижные звезды. Если же мы применим систему координат, неподвижно связанную с землей, то окажется, что в отношении к ней каждая неподвижная звезда описывает в течение одного (астрономического) дня круг огромного радиуса, что противоречит буквальному смыслу закона инерции. Следовательно, если твердо его придерживаться, то движения надо относить лишь к таким системам координат, в отношении к которым неподвижные звезды не совершают никаких круговых движений. Систему координат, состояние движения которой таково, что в применении к ней имеет силу закон инерции, мы называем «Галилеевой системой координат». Только в отношении к Галилеевой системе координат применимы законы Галилее-Ньютоновой механики.

V. Принцип относительности (в более узком смысле).

Ради большей наглядности обратимся снова к примеру с равномерно движущимся вагоном железной дороги. Его движение мы называем равномерно-поступательным: «равномерным» потому, что оно сохраняет постоянную скорость и направление; «поступательным» потому, что хотя вагон и меняет свое место в отношении к полотну железной дороги, но он не совершает при этом никаких вращений. По воздуху летит ворон прямолинейно и равномерно, если судить о его движении с полотна дороги; тогда полет ворона, рассматриваемый из движущегося вагона, представит движение, хотя другой скорости и в другом направлении, но точно также прямолинейное и равномерное. Выразим это абстрактно: если масса m движется прямолинейно и равномерно в отношении к системе координат K, то ее движение будет также прямолинейным и равномерным и в отношении ко второй системе координат K, если последняя в отношении к системе K находится в равномерно-поступательном движении. Отсюда в связи с разъяснениями предыдущего параграфа следует такой вывод.

Если K есть Галилеева система координат, то Галилеевой же будет и всякая другая система координат K', находящаяся по отношению к системе K в состоянии равномерного поступательного движения. В отношении K' законы Галилее-Ньютоновой механики имеют совершенно такую же силу, как в отношении K.

Мы сделаем еще один шаг дальше по пути обобщения, высказав следующее положение: если K' представляет собой в отношении K равномерно и без вращения движущуюся систему координат, то все события природы протекают в отношении к K' по точно тем же всеобщим законам, как и в отношении к K. Это утверждение мы называем «принципом относительности» (в более узком смысле).

Покуда было в силе убеждение, что все события природы могут быть представлены на основе классической механики, до тех пор не приходилось сомневаться в действительности этого принципа относительности. Но по мере новейшего развития электродинамики и оптики, все более становилось очевидно, что классическая механика не может уже служить основой для описания всех явлений физической природы. С тем вместе вопрос о допустимости принципа относительности стал вполне спорным, и, казалось, не исключена была возможность, что ответ на него будет отрицательным.

Все же существуют два факта общего значения, которые заранее сильно говорят в защиту приемлемости принципа относительности, а именно: если классическая механика и не дает достаточно широкого базиса для теоретического изображения всех физических явлений, то все же она должна заключать в себе значительную долю истины, ибо она позволяет установить с удивительной точностью движения небесных тел. А тогда и принцип относительности должен во всяком случае обладать большой точностью в области механики. Однако, является a priori мало вероятным, чтобы принцип столь большого общего значения, будучи применяем с такой точностью в одной области явлений, оказался недействительным в другой.

Второй аргумент, к которому позже мы еще снова вернемся, заключается в следующем. Если принцип относительности недействителен, то, значит, Галилеевы системы координат K, K', K'' и т. д., находящиеся по отношению друг к другу в состоянии равномерного движения, будут неравноценны для описаний явлений природы. А тогда почти необходимо пришлось бы допустить, что законы природы могут быть особенно просто и естественно формулированы лишь при условии выделения из всех Галилеевых систем координат в качестве исходного тела именно какой-то одной (K_0), обладающей определенным состоянием движения. Тогда мы ее охарактеризовали бы по праву (вследствие ее преимуществ для описания природы), как находящуюся в «абсолютном покое», а все остальные Галилеевы системы K, как находящиеся «в движении». Если бы, например, наше железнодорожное полотно было системой K_0, то наш вагон был бы системой K, в отношении которой действовали бы законы менее простые, нежели в отношении K_0. Эту меньшую простоту законов пришлось бы отнести на счет того обстоятельства, что вагон K был бы в движении по отношению к K_0 (т.-е. в «действительном» движении). В формулированных в отношении к K общих законах природы играли бы известную роль величина и направление скорости движения вагона. Так, например, следовало бы ожидать, что тон органной трубы был бы иной при параллельном положении ее оси к направлению движения, нежели при перпендикулярном. Но наша земля, в силу ее движения вокруг солнца, может быть уподоблена вагону, движущемуся со скоростью около 30 километров в секунду. Следовательно, в случае, если принцип относительности недействителен, надо было бы допустить, что направление движения земли в данный момент отражается на законах природы. А в силу этого физические системы в своих процессах зависели бы от их пространственного расположения по отношению к земле, так как последняя, меняя в течение своего годового пробега направление скорости движения, не может оставаться весь год в состоянии покоя по отношению к гипотетической системе K_0. Однако, при всей тщательности наблюдений никогда не была отмечена такая анизотропия земного физического пространства, т.-е. подобная физическая неравноценность различных направлений,—и в этом весьма веский аргумент в пользу принципа относительности.