

# ОСНОВЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ В СОДЕРЖАНИИ ШКОЛЬНЫХ КУРСОВ ФИЗИКИ

*Алексей Николаевич Малинин,*

*профессор кафедры физики Липецкого государственного педагогического университета,  
доктор педагогических наук*

*Иван Вячеславович Гордеев,*

*ассистент кафедры физики Липецкого государственного педагогического университета*

• принцип научности • методология научного познания • фундаментальная физическая теория • теория относительности •

Один из ведущих дидактических принципов — принцип научности. Согласно ему, основы физической науки должны быть представлены в содержании школьного курса физики (базового и любого профиля) так, чтобы адекватно отразить методологию научного познания и сущность соответствующей теоретической модели. Упрощения, связанные с применением доступных учащимся математических средств, возможны и, безусловно, необходимы, но они не должны затрагивать концептуального ядра физической теории, её основополагающих идей и понятий, приводить к профанации предмета познания, допускать некорректные и даже неправильные суждения, противоречащие физической науке.

Сейчас в моде так называемые современные компьютерные технологии обучения. Конечно, возражать против них нелепо. Однако не следует забывать, что их применение дидактически эффективно только тогда, когда они базируются на таком учебном материале, в котором в максимально возможной степени реализован принцип научности. В противном случае такие технологии даже вредны, и можно высказать крамольную мысль: не

вам фундаментальной физической теории — специальной теории относительности (СТО, далее — теория относительности). С 70-х годов прошлого века изучение элементов теории относительности было включено в школьную программу по физике. Их традиционное изложение восходит к широко известному учебнику<sup>1</sup>. Здесь без выводов «как следствия, вытекающие из постулатов теории относительности» записываются формулы для соотношений длин и длительностей, определяемых в различных инерциальных системах отсчёта. Поскольку в рамках теории относительности не определяются понятия расстояния, времени и скорости и не принимается во внимание принцип относительности, то утверждения о том, что «длина зависит от движения тела», а «время в движущихся системах замедляется»<sup>2</sup>, понять учащимся весьма затруднительно.

Возьмём один из самых тиражируемых современных школьных учебников физики<sup>3</sup>. Изложение теории относительности даётся здесь в рамках релятивистской схемы Эйнштейна со ссылкой на опыт Майкельсона-Морли. Особая значимость, как и во всех других школьных учебниках, придаётся понятию одновременности пространственно разделённых событий и вопросу о «замедлении времени». При этом «относительность одновременности» (в отличие от классической одновременности) преподносится как удивительное и необычное положение теории относительности, её существенный результат. Так же сенсационно утверждается о необычном релятивистском

вовполне корректным трактовкам изучаемых физических теорий лучше обучать плохо, чем хорошо!

В значительной степени сказанное относится к обучению школьников осно-

<sup>1</sup> **Мякишев Г.Я.** Физика: Учебное пособие для 10 класса средней школы / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев. М.: Просвещение, 1972. 368 с.

<sup>2</sup> Там же. С. 237–239.

<sup>3</sup> **Касьянов В.А.** Физика. 10 кл.: Учебн. для общеобразовательных учеб. заведений. М.: Дрофа, 2002. 416 с.

эффекте «замедления времени», следствием которого будто бы оказывается «парадокс часов» или, иначе, «парадокс близнецов». Без каких-либо оговорок заявляется следующее: «Время в неподвижной системе отсчёта и движущейся относительно неё течёт с разной скоростью  $t \neq t'$ »<sup>4</sup>. Почему так, если согласно принципу относительности (одному из постулатов теории относительности) все инерциальные системы отсчёта (ИСО) эквивалентны, а понятия «скорости течения времени» в теории относительности вообще нет, тем более относящегося к неравенству  $t \neq t'$ ?

Наконец, в этом учебнике заключается: «Время не является инвариантом для различных ИСО»<sup>5</sup>. Однако, такое утверждение неправильное. Если речь идёт о «собственном времени», т.е. времени, измеряемом одними часами, то оно инвариантно (абсолютно). Иначе говоря, это положение означает, что за счёт инерциального движения нельзя раньше срока ни состариться, ни помолодеть (прямое следствие принципа относительности). Если имеется в виду «координатное время» (или по-другому «временная координата», в общем случае именно она входит в преобразования Лоренца), то, действительно, оно неинвариантно — такое «время» зависит от выбора системы отсчёта и от принятого способа его определения, носящего условно-координатный характер (подробнее о последнем см. далее).

Традиционной схеме изложения теории относительности в целом следуют и другие школьные учебники<sup>6</sup>. В последнем предпринята скромная и, к сожалению, весьма поверхностная попытка рассказать учащимся о пространстве-времени Минковского. Например, здесь даётся следующее определение: «Графики движения частиц в пространстве-времени называют **мировыми линиями**»<sup>7</sup>. Но в пространстве-времени — мире событий Минковского — никаких «графиков движения» нет!

Удивительно, но в учебнике для классов гуманитарного профиля<sup>8</sup> дано предельно краткое изложение теории относительности, следуя логической схеме: постулаты Эйнштейна → пространство-время Минковского. Здесь описательно вводятся понятия псевдоевклидова пространства и псевдоевклидова вектора, применяется наглядное изображение 2-мерного мира событий Минковского. Однако такой формально-описа-

тельный подход вряд ли доступен гуманитариям.

Резюмируя, следует сказать, что в большинстве школьных учебников по физике элементы теории относительности, как правило, изучаются согласно традиционной схеме: постулаты Эйнштейна → относительность одновременности → кинематические следствия: «замедление хода движущихся часов» (или «замедление времени»), «сокращение длины движущейся линейки», релятивистский закон сложения скоростей → обобщение второго закона Ньютона на случай быстрых движений. Теория относительности представляется здесь не как теория пространства-времени, а как механика больших скоростей (сравнимых со скоростью света). Некорректным оказывается использование в теории относительности классических понятий — твёрдой эталонной линейки (для измерения пространственных расстояний) и всеобщего времени в инерциальной системе отсчёта (последнее неявно вводит мгновенный сигнал). Как правило, отсутствует система определений новых, релятивистских понятий — времени, пространственного расстояния и скорости на основе метода сигнализации<sup>9</sup>, что неизбежно ведёт к смешению классических и релятивистских понятий и, следовательно, к некорректным и даже ошибочным трактовкам теории относительности.

Основная трудность восприятия, правильного понимания и выражения таких фундаментальных теорий как теория относительности и квантовая механика заключается в решительном отмежевании от классических представлений о пространстве, времени, частицах (телах) и их движении. Эти представления входят в наше сознание с

<sup>4</sup> Касьянов В.А. Физика. 10 кл.: Учебн. для общеобразовательных учеб. заведений. М.: Дрофа, 2002. С. 200.

<sup>5</sup> Там же. С. 203.

<sup>6</sup> Громов С.В. Физика: Основы теории относительности и классической электродинамики: Учеб. для 10 кл. общеобразовательных учреждений / С.В. Громов. М.: Просвещение, 1997. 320 с.

<sup>7</sup> Там же. С. 23.

<sup>8</sup> Мансуров А.Н. Физика: Учеб. для 10–11 кл. шк. с гуманитарным профилем обучения. М.: Просвещение, 1999. 222 с.

<sup>9</sup> Фок В.А. Теория пространства, времени и тяготения. М.: ГИФМЛ, 1961. С. 50; Синг Дж. Беседы о теории относительности. М.: Мир, 1973. С. 80–81.

раннего детства ещё до изучения понятий и законов ньютоновой механики, которые их, так сказать, научно в нашем сознании закрепляют. Более того, как выразился известный английский физик А. Эддингтон, классические представления о пространстве и времени в качестве врождённых передались нам генетически от обезьяноподобных предков.

Источником классических представлений служит наш обыденный пространственно-локализованный опыт, в котором мы употребляем твёрдые масштабные линейки для измерения расстояний, наблюдаем движение тел, естественным образом определяя их как процессы изменения пространственных положений с течением времени, характеризуемые скоростью, ускорением, траекторией. В таком опыте в нашем сознании формируется представление о том, что есть всеобщее время, в котором однозначный и реальный смысл имеет понятие события «сейчас-там» объективно одновременного событию «сейчас-здесь», как бы пространственно эти события ни были разделены. Иными словами, нам естественным образом представляется, что мгновение — одно для всего окружающего нас мира, *время всеобщее* для всех наблюдателей и тел, независимо от их движения.

Как только мы поймём, что классические представления о пространстве и времени основываются на предположении о существовании мгновенного сигнала, и откажемся от такого предположения на основе экспериментальных фактов, свидетельствующих о том, что самым быстрым в природе является электромагнитный (световой) сигнал, мы неизбежно приходим к теории относительности. И здесь обнаруживается, что всеобщего времени не существует, что *время индивидуально*, и поэтому объективно нет единого «сейчас» для всего окружающего нас мира. Отсюда следуют удивительные экспериментально наблюдаемые релятивистские эффекты и новая механика, концептуально отличная от механики Ньютона, особенно законом неаддитивности массы системы частиц и законом взаимосвязи массы и энергии.

Эйнштейн в 1905 году построил теорию относительности, можно сказать, по

образу и подобию ньютоновой механики<sup>10</sup>. Здесь физические величины — время, расстояние, скорость, ускорение, импульс, сила в обозначениях и названиях формально схожи с соответствующими величинами и соотношениями ньютоновой механики (хотя и не все!). Между тем, они понятийно существенно отличаются от последних. Игнорирование этого обстоятельства ведёт к не вполне адекватным трактовкам отдельных положений теории относительности и релятивистской механики. Не зря крупный специалист в области релятивистской физики ирландский физик-теоретик Дж. Синг (ряд его книг переведены на русский язык) предупреждает: «Если вы не расстанетесь со старыми представлениями (пространства и времени. — Авт.) на пороге нового мира (теории относительности. — Авт.), то рискуете споткнуться и упасть ещё раньше, чем сделаете в нём первый шаг»<sup>11</sup>.

Так, понятие одновременности событий есть в ньютоновой механике и в теории относительности. Но если одновременность в ньютоновой механике объективна и устанавливается мгновенным сигналом, роль которого в достаточно малых пространственных масштабах практически может играть электромагнитный (световой) сигнал (таким сигналом в ряде регионов нашей страны устанавливаются часы на показание «московского времени»), то одновременность в теории относительности пространственно разделённых событий фиктивна и субъективна, носит условно-дефинитный характер. Она не может быть в принципе никаким экспериментальным путём установлена. Поэтому одновременность событий в теории относительности — всего лишь *координатное понятие*, относящееся к событиям с одинаковой *временной координатой*. Временная координата события и время события — существенно различные понятия.

За счёт введения по тому или иному условно принимаемому определению временной координаты или, иначе, *координатной одновременности* для всех пространственных точек данной инерциальной системы отсчёта мысленно (но не реально!) устанавливается общее для них *координатное время*, что эквивалентно столь же условной и не реальной синхронизации часов, расположенных в разных пространственных точках — как бы установлению их на показа-

<sup>10</sup> Эйнштейн А. Собрание научных трудов: В 4 т. М.: Наука, 1965. Т. 1. С. 7–35.

<sup>11</sup> Синг Дж. Беседы о теории относительности. М.: Мир, 1973. С. 49.

ние этого общего координатного времени. В другой инерциальной системе отсчёта точно такая же *мысленная операция* (т.е. по тому же правилу) устанавливает для её пространственных точек общее координатное время и соответственно координатную одновременность. Координатное время и координатная одновременность в одной инерциальной системе отсчёта не совпадают с координатным временем и координатной одновременностью в другой инерциальной системе отсчёта. То есть, координатное время и координатная одновременность относительны. Но в такой относительности нет ничего физически значимого, т.к. она касается координатных (экспериментально ненаблюдаемых) величин и соответствующих им понятий.

С принятием фундаментального постулата теории относительности — утверждения о том, что предельно быстрым сигналом в природе является световой (электромагнитный) сигнал, исключаяющим, таким образом, классический мгновенный сигнал и вместе с ним всеобщее для всех тел окружающего нас мира время, возникает ряд проблем. Как в таком случае определить пространственное расстояние между двумя точками  $A$  и  $B$  (иначе — телами)? Применение здесь твёрдой эталонной линейки в принципе исключается, т.к. она — классический объект, предполагающий мгновенный сигнал: по определению такой линейки воздействие на один её конец должно передаваться другому концу мгновенно. Как определить понятие «время распространения сигнала (то же массовой частицы) в одном направлении»? Для этого необходимо двое часов (расположенных в местах старта и финиша сигнала), которые должны быть синхронизированы, т.е. показывать одинаковое время в общий для них момент «сейчас». Но последний в теории относительности исключается в связи с её фундаментальным постулатом. Однако, не определив понятия пространственного расстояния и времени распространения светового сигнала (или то же — массовой частицы) в одном направлении, нельзя определить понятие скорости и, следовательно, строить механику (сначала кинематику, затем динамику). Возникает, таким образом, «патовая ситуация». Как быть?

Подобная постановка проблемных вопросов в дебютной части изложения теории относительности обязательна. К сожалению,

при традиционном подходе в школьных учебниках физики сразу же формулируется постулат Эйнштейна о постоянстве и предельности скорости света, тем самым молчаливо предполагая, что понятие скорости в теории относительности такое же, как и в ньютоновой механике. Здесь — источник всех дальнейших некорректных трактовок теории относительности, начиная с понятия одновременности событий.

Для решения названных выше проблем, связанных с отрицанием мгновенного сигнала и всеобщего времени, необходимо применить метод сигнализации (или радиолокации). Именно таким методом Эйнштейн вводит понятие одновременности событий в теории относительности. Рассмотрим следующий мысленный опыт (безусловно осуществимый в реальности). В точках  $A$  и  $B$  находятся наблюдатели со стандартными (атомными) часами и радарными установками, позволяющими им обмениваться электромагнитными (далее традиционно будем называть их «световыми») сигналами. В момент времени  $t_1$  по своим часам наблюдатель из точки  $A$  отправляет сигнал к наблюдателю в точке  $B$ . После отражения в последней сигнал возвращается к наблюдателю в точке  $A$  в момент времени  $t_2$  по его часам.

Может ли наблюдатель в точке  $A$  узнать, в какой момент времени по его часам световой сигнал достиг точки  $B$ ? Нет, не может. Казалось бы, что такому ответу есть возражение. Нам экспериментально известна скорость светового сигнала ( $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с), а расстояние можно измерить линейкой. Тогда ясно, что сигнал должен прибыть в точку  $B$  в момент времени по часам точки  $A$ , равной  $t_1$  плюс время его распространения, *вычисляемое* по известным расстоянию  $AB$  и скорости сигнала. Значит, часы в точке  $B$ , чтобы быть синхронизированными с часами в точке  $A$ , необходимо установить именно на это показание. В таком случае показания часов  $A$  и  $B$  будут «одновременно одинаковыми».

Однако подобное рассуждение в рамках теории относительности неправомерно. Оно соответствует классическому образу мышления, основанному на понятиях пространства, времени и движения ньютоновой механики. Нам неизвестно ни расстояние  $AB$  (как сказано выше, в теории относительнос-

ти применять твердую эталонную линейку нельзя), ни скорость светового сигнала в одном направлении (величина  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с явно имеет классический смысл) — экспериментально измеряется в классических опытах только скорость светового сигнала на пути туда-обратно, т.е. используя одни часы.

Аналогичное квазиклассическое рассуждение применяется в трактовке другого мысленного опыта (излагаемого в различных литературных источниках, в том числе в школьных учебниках физики). На середине расстояния  $AB$  в точке  $C$  (её можно установить методом сигнализации) находится точечный источник света, а в точках  $A$  и  $B$  расположены стандартные часы. После вспышки источника световые сигналы распространяются к часам в точках  $A$  и  $B$ . Так как  $CA = CB$ , а скорость светового сигнала постоянна и, следовательно, одинакова по всем направлениям, то сигналы придут соответственно в точки  $A$  и  $B$  одновременно, включив, таким образом, одновременно часы в этих точках. Тем самым экспериментально осуществляется синхронизация данных часов — одновременная их установка на одинаковое показание.

Всё это рассуждение в целом носит классический характер. Замените световой сигнал массовыми частицами, например, шариками, соединёнными в точке  $C$  сжатой пружиной<sup>12</sup>. После того, как пружину отпускают, шарики движутся с одинаковой скоростью (по закону сохранения импульса) и придут в точки  $A$  и  $B$  одновременно. Так действительно устанавливается классическая одновременность, основанная на классическом понятии скорости. Когда утверждается, что скорости световых сигналов в диаметрально противоположных направлениях одинаковы, то явно оперируют понятием «скорости в одном направлении». А это понятие предполагает определённым понятие «время распространения сигнала в одном направлении», имеющим смысл только в случае, если для точек  $C$  и  $A$  (и, то же,  $C$  и  $B$ ) установлено единое время, т.е. часы в этих точках одновременно показывают одинаковое время. Таким образом, в послышке уже содержится то, что требуется доказать.

Всё это рассуждение содержит тавтологию и, следовательно, логически дефектно.

Иначе и быть не может, т.к. существование всеобщего для точек  $A$  и  $B$  времени предполагает мгновенный сигнал, исключаемый фундаментальным постулатом теории относительности. Конечно, часы в точках  $A$  и  $B$  могут показывать одинаковое время, но такие показания нельзя отнести к единому для этих часов моменту «сейчас» ввиду его отрицания теорией относительности. Повторим сказанное ранее: объективная одновременность событий, свершаемых в различных пространственных точках, согласно теории относительности невозможна, и установить её, следовательно, никаким экспериментальным путём нельзя. Это — прямое следствие фундаментального постулата теории относительности. Возможна лишь условно-дефинитная, координатная одновременность (в литературе её называют «относительной одновременностью», вуалируя таким названием её субъективный смысл).

О том, что в теории относительности следует «забыть об одновременности» (имея, конечно, в виду объективно-физическую одновременность) без обиняков и справедливо пишет Дж. Синг. Условный характер одновременности в теории относительности отмечает У. Бёрке<sup>13</sup>, обращая внимание на то, что без этого понятия в теории относительности вообще можно обойтись, т.е. оно не затрагивает её сущности.

В рассмотренном выше мысленном опыте с двумя часами, расположенными в точках  $A$  и  $B$ , Эйнштейн предложил принять *по условному определению*, что в момент прихода светового сигнала к часам в точке  $B$  часы в точке  $A$  (откуда послан сигнал) показывают время:  $t_A = (t_1 + t_2)/2$ , и точно такое же время должно быть на часах в точке  $B$ :  $t_B = t_A$ , когда сигнал достигает последней.

Здесь имеются в виду два события: одно, свершаемое в точке  $A$ , — показание  $t_A$  часов в этой точке, другое, свершаемое в точке  $B$ , — приход к ней светового сигнала. Поскольку наблюдатель в точке  $A$  не в состоянии экспериментально установить по часам точки  $A$  время прибытия сигнала в точку  $B$ , то ему не остаётся ничего иного как *условно приписать* по своим часам событию в точке  $B$  какое-то время  $t_1 < t < t_2$ . Какое? В принципе любое из промежутка  $(t_1, t_2)$ . Приписываемое событию в точке  $B$  наблюдателем в точке  $A$  время по своим ча-

<sup>12</sup> Терлецкий Я.П. Парадоксы теории относительности. М.: Наука, 1966. С. 20–21.

<sup>13</sup> Бёрке У. Пространство-время, геометрия, космология. М.: Мир, 1985. С. 68–69.

сам и есть временная координата этого события (относительно данного наблюдателя).

По определению Эйнштейна, временная координата события в точке  $B$  (отражения в нём светового сигнала, отправленного от наблюдателя в точке  $A$ ) есть среднее времён  $t_1, t_2$  (отправки и приёма сигнала в точке  $A$ ). Тогда *условное (координатное) время* распространения светового сигнала на пути туда  $AB$  равно условному (координатному) времени его распространения обратно на пути  $BA$  и составляет:  $(t_2 - t_1)/2$ . Это условно-координатное время принимается в релятивистской схеме Эйнштейна в качестве определения пространственного расстояния  $AB$ . Тогда координатная скорость света полагается равной:  $c \equiv 1$ .

Следует заметить, что принятие того или иного, в частности эйнштейнова определения координатной одновременности событий и использование координатных величин не является в теории относительности физически значимым. Они могут применяться в расчётах экспериментально наблюдаемых релятивистских эффектов, например, эффекта Доплера. В итоге получается правильный результат, поскольку из конечных формул такие величины либо выпадают<sup>14</sup>, либо взаимно компенсируются. Если же в конечных формулах координатная одновременность существенна, то они экспериментально не наблюдаются.

К подобным результатам как раз относится формула так называемого эффекта «замедления времени», выводимая из преобразований Лоренца, основанных на эйнштейновом определении координатной одновременности событий. Её можно трактовать двояко:

- 1) как соотношение времён, отмеряемых стандартными часами движущихся друг относительно друга инерциальных наблюдателей (встречающихся однажды), осуществляемое посредством эйнштейновой координатной одновременности (при других определениях последней получают иные результаты сравнения показаний этих часов);
- 2) как результат сравнения времени, отмеряемого стандартными часами инерциального наблюдателя, и *условно приписываемого* им по эйнштейнову определению координатного времени, относящегося к событиям, связанным с движущимися

относительно наблюдателя часами. В любой из этих трактовок с очевидностью ясно, что результат сравнения показаний часов, встречающихся однажды, зависит от выбора определения условно-координатной одновременности событий. Именно поэтому он оказывается экспериментально ненаблюдаемым.

Другое дело, когда сравниваются показания двух стандартных часов, встречающихся дважды: одни из них инерциальные, а другие движутся относительно первых ускоренно — сначала удаляясь, а затем возвращаясь к ним (известный «парадокс близнецов»). Результат такого сравнения (показания движущихся часов окажутся меньшими показаний покоящихся часов) объективен, и поэтому он не зависит от способа координации событий — выбора того или иного определения их координатной одновременности. Теоретический вывод этого экспериментально наблюдаемого в принципе релятивистского эффекта может быть произведён на основе формулы «замедления времени», о которой шла речь выше. Такой вывод объективного релятивистского результата создаёт иллюзию будто бы объективности и экспериментальной наблюдаемости этой формулы. Но расчёт сравнения показаний двух стандартных часов, встречающихся дважды (в рассмотренном выше мысленном опыте), может быть произведён бескоординатным методом, т.е. без применения определения координатной одновременности событий (в релятивистской схеме Минковского посредством алгебры псевдоевклидовых векторов<sup>15</sup>).

Адекватное восприятие и понимание учащимися теории относительности в той схеме, которую в 1905 г. построил Эйнштейн, затруднено, как отмечено выше, формальной схожестью ряда её понятий и соотношений с понятиями и соотношениями теоретической схемы ньютоновой механики, в которой пространство и время рассматриваются отдельно друг от друга. В 1907–1908 гг. Г. Минковский построил иную схему выражения теории относительности, основываясь на так называемом *мировом постулате*, согласно которому *мир событий в пространственно-временном*

<sup>14</sup> Мардер Л. Парадокс часов. М.: Мир, 1974. С. 53.

<sup>15</sup> Малинин А.Н. Теория относительности и релятивистская механика (в школьном курсе физики): Учеб. пособие для студентов педвузов / А.Н. Малинин, И.В. Гордеев. Липецк: Изд-во ЛГПУ, 2011. С. 89.

отношении образует 4-мерное пространство с псевдоевклидовой геометрией<sup>16</sup>. В этом одном постулате заключена сущность и всё содержание теории относительности.

Методика изучения элементов теории относительности в школьном курсе физики профильного уровня на основе модели пространства-времени Минковского изложена в работах авторов статьи<sup>17</sup>. Содержательная часть методики, касающейся описания геометрических особенностей релятивистского пространственно-временного мира событий и его физической интерпретации, вкратце следующая. Мир состоит из мировых и изотропных линий. События, составляющие мировые линии (прямые и кривые) ассоциируются с массовыми частицами или с наблюдателями, снабжёнными стандартными часами. Длина отрезка мировой линии представляет собой промежуток времени, отмеряемый часами, ассоциируемыми с этой линией. В релятивистском мире событий множество индивидуальных времён соответственно множеству мировых линий. С очевидностью ясно, что единого мирового времени не существует.

Изотропные линии (только прямые) — линии нулевой длины. Они ассоциируются со световыми сигналами (или безмассовыми частицами — фотонами). Равенство нулю отрезка изотропной прямой физически выражает по образному выражению Синга то, что «на фотоне часы вообще не идут» (иначе, с фотонном никакие часы связать нельзя).

Мировые прямые, а также касательные к мировым кривым, образуют бесконечно большие углы с изотропными прямыми. Этот геометрический факт мира событий

Минковского выражает то, что последние предельны для мировых линий. В чувственно воспринимаемом пространстве он трактуется как предельность светового сигнала для любых массовых частиц и сигналов (фундаментальный постулат теории относительности). Мировые прямые находятся в одинаковом отношении к изотропным прямым, что отражает их симметрию — принцип относительности (эквивалентности) инерциальных наблюдателей, связанных с мировыми прямыми.

В пространственно-временном мире можно образовать линии, события которых принадлежат разным мировым и изотропным линиям. Поэтому такие линии (их называют пространственно-подобными) не ассоциируются с каким-либо физическим процессом. Длина их отрезка комплексная (не выражается вещественным числом). Понятно, что события, объединённые в пространственно-подобную линию, объективно не могут находиться в причинно-следственной связи, для них не имеет смысла временной порядок. Посредством пространственно-подобных линий (применяемых наряду с мировыми линиями для координации событий) определяют то, что выше называлось координатной одновременностью. Понятно, что поскольку пространственно-подобные линии не имеют физической интерпретации, то не имеет её и координатная одновременность (о чём шла речь выше).

В каждой точке-событии мира Минковского есть так называемый *световой конус*. Он разбивает этот мир относительно точки-события — вершины конуса — на четыре сектора. События двух секторов находятся с этим событием в объективном временном отношении «раньше-позже», а события двух других секторов не имеют с ним объективного временного отношения — возможно только субъективно-координатное условное временное отношение (в смысле соотношения «больше-меньше» временных координат).

Восприятие пространственно-временного мира событий наблюдателем зависит от того, какова его мировая линия. Если она прямая, то наблюдатель инерциальный, и ему доступна вся Вселенная в том смысле, что рано или поздно посредством сигналов (той или иной природы) он получит информацию о любом свершившемся в ней событии. Если же мировая линия наблюдателя

<sup>16</sup> **Логунов А.А.** Лекции по теории относительности и гравитации: Современный анализ проблемы. М.: Наука, 1987. 272 с.; **Сазанов А.А.** Четырёхмерный мир Минковского. М.: Наука, 1988. 224 с.

<sup>17</sup> **Гордеев И.В.** Методика изучения в школьном курсе физики профильного уровня элементов теории относительности на основе модели пространства-времени Минковского // Вестник Московского государственного областного университета. 2010. № 4. С. 118–123. (Серия «Педагогика»); **Гордеев И.В.** Элементы теории относительности и релятивистской механики (в школьном курсе физики профильного уровня): Учеб. пособие для студентов педвузов / И.В. Гордеев, А.Н. Малинин. Липецк: Изд-во ЛГПУ, 2010. 40 с.; **Гордеев И.В.** Теория относительности (вопросы, упражнения, задачи): Учеб. пособие для студентов педвузов / И.В. Гордеев, А.Н. Малинин. Липецк: Изд-во ЛГПУ, 2010. 49 с.; **Малинин А.Н.** Теория относительности и релятивистская механика (в школьном курсе физики): Учеб. пособие для студентов педвузов / А.Н. Малинин, И.В. Гордеев. Липецк: Изд-во ЛГПУ, 2011. 117 с.

кривая, то такой наблюдатель называется неинерциальным (он движется с ускорением относительно инерциального наблюдателя). Для неинерциального наблюдателя существует так называемый *горизонт событий* — граница, отделяющая события, о которых он никогда не узнает (о горизонте событий в мире Минковского см. подробнее в книге П. Бергмана<sup>18</sup>). В классическом же мире событий Ньютона для любого наблюдателя горизонта событий нет.

Замечательной геометрической особенностью псевдоевклидова мира событий является, по выражению Синга<sup>19</sup>, перевёрнутое «правило сторон треугольника» (по сравнению с правилом сторон треугольника в обычном евклидовом пространстве): в треугольнике, образованном мировыми прямыми, сумма двух сторон *меньше* другой стороны (последняя замыкает по направлению ломанную линию из первых двух). Из обобщения этого правила на случай мировой прямой, дважды пересекающей мировую кривую, следует, что длина отрезка кривой между событиями-пересечениями с прямой меньше отрезка последней. Поскольку длина мировой линии выражает собой соответствующее индивидуальное время, физически это положение интерпретируется как «парадокс близнецов» (хотя собственно парадокса здесь нет): неинерциально (ускоренно) движущийся близнец проживёт меньше своего инерциального (покоящегося) брата-близнеца между двумя встречами с последним. Существенно обратить внимание на то, что этот релятивистский эффект объективен, является следствием геометрической структуры релятивистского мира событий Минковского, а не того, как в этом мире координируются события (выбирается пространственно-подобная линия координатной одновременности).

В заключение следует сказать учащимся о том, что физические свойства материи органически взаимосвязаны с геометрическими свойствами пространства-времени. То есть, если нам известна геометрия мира событий, то ей должна соответствовать (быть изоморфной) определённая физика. Синг показал, как «перевёрнутое правило сторон треугольника» в релятивистском мире событий, относящееся к псевдоевклидову вектору импульса, определяет то, что называют ядерной энергией. Этот подход (исключающий применение специальной ма-

тематики) можно рекомендовать для школьного курса физики.

В учебной литературе по теории относительности до сих пор превалирует трактовка пространственно-временного мира событий Минковского в качестве исключительно математического, воображаемого мира, предназначенного для геометрической интерпретации релятивистской схемы Эйнштейна, основанной, в общем, на квазиклассическом представлении: «частицы, пространство и время». Согласно последнему событиям и их последовательности (движения частиц) свершаются в 3-мерном евклидовом пространстве с течением собственного (индивидуального по часам частиц) или координатного (условно-общего) времени. Именно такой мир трактуется в качестве объективного презентанта физической реальности по сравнению с будто бы лишь воображаемым миром событий Минковского.

Здесь учителю необходимо разъяснить учащимся следующее. Любые познавательные представления и модели — всего лишь мысленные отражения реальности. В частности это относится как к миру Эйнштейна, так и к миру Минковского. Некорректно отождествлять модель и реальность (такое отождествление Синг назвал «синдромом Пигмалиона»). Речь может идти только о том, насколько та или иная теоретическая модель объективна, полнее и глубже отражает окружающий нас физический мир. Эйнштейн в последних своих работах по теории относительности отмечал, что модель пространства-времени представляет собой «более объективную картину реальности», чем модель пространства и времени, поскольку с точки зрения теории относительности разделение 4-мерного пространства-времени на пространство и время оказывается «произвольным процессом, не имеющим объективного смысла»<sup>20</sup>. О том, что понятие мировой линии в пространстве-времени Минковского объективнее презентует реальность, чем понятие частицы (как материальной точки в пространстве), убедительно показано А.А. Сазановым<sup>21</sup>. □

<sup>18</sup> Бергман П. Загадка гравитации. М.: Наука, 1969. С. 111–115.

<sup>19</sup> Синг Дж. Беседы о теории относительности. М.: Мир, 1973. С. 164.

<sup>20</sup> Эйнштейн А. Эволюция физики / А. Эйнштейн, Л. Инфельд. М.: Наука, 1965. С. 172.

<sup>21</sup> Сазанов А.А. Четырёхмерный мир Минковского. М.: Наука, 1988. С. 120–122.