
ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ¹

I. Специальная теория относительности

Вряд ли можно выработать самостоятельное суждение о правильности теории относительности, не ознакомившись хотя бы вкратце с опытами и идеями, предшествовавшими этой теории. Поэтому с них и надо здесь начать.

Явления интерференции и дифракции заставляли физиков рассматривать свет как волновой процесс. Почти до конца прошлого века считали, что свет представляет собой механические колебания гипотетической среды — эфира. Так как свет распространяется и в пустоте, то волновой процесс, образующий свет, не мог быть колебаниями весомой материи. Когда к концу прошлого века победила электромагнитная теория света, это представление о свете хотя и изменилось, но несущественно: свет теперь стал рассматриваться не как движение эфира, а как электромагнитный процесс в эфире. Все еще сохранялось убеждение, что наряду с весомой материей существует другая — эфир, который должен быть носителем света.

Это представление приводило к вопросу о том, какими механическими свойствами по отношению к веществу обладает этот эфир. В частности, возникает вопрос: участвует ли эфир в движении весомой материи? Этот вопрос побудил гениального физика Физо провести опыт фундаментального значения, который мы сейчас схематически рассмотрим.

Пусть луч света L падает на полупрозрачное зеркало S_1 и разделяется этим зеркалом на два (рис. 1). Первый луч, пройдя отрезки a и b и отразившись от зеркала s_2 , попадает на полупрозрачное зеркало S_2 , отражается от него и идет в направлении E . Второй луч, отражаясь от зеркал S_1 и s_1 , идет по отрезкам c и d , проходит через S_2 в направлении E . В точке E оба луча интерферируют; возникают интерференционные полосы, расстояние между которыми зависит от юстировки аппарата. Положение этих интерференционных полос зависит от разности

¹ *Die Relativitätstheorie*. В кн. «Die Physik». Unter Redaktion von E. Lechner. Т. 3, Abt. 3, Bd. 1. Leipzig, Teubner, 1915, 703–713.

времен прохождения каждым лучом своего пути. Если относительная разность времен изменится даже на 10^{-8} , т. е. на одну стомиллионную часть времени прохождения всего пути, то это уже приведет к заметному сдвигу интерференционных полос.

На отрезках a и d Физо поместил по трубе, наполненной водой, и каждый из лучей распространялся вдоль своей трубы. Концы каждой трубы были соединены так, что вода могла протекать вдоль осей труб. Цель опыта заключается в том, чтобы определить, ка-

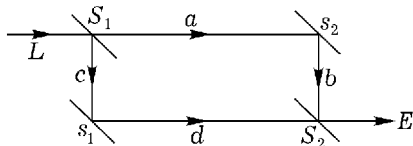


Рис. 1

кое влияние оказывает движение воды на положение интерференционных полос. Зная это влияние, можно вычислить, насколько изменяется скорость света в движущейся воде по сравнению с покоящейся водой.

В предположении, что световой эфир участвует в движении вещества, а следовательно, и в движении воды, для случая, когда вода на участке a течет со скоростью v в направлении распространения света, должна получаться следующая картина. Скорость света относительно воды всегда оставалась равной V_0 , независимо от того, течет вода или нет. Но скорость света V относительно трубы должна увеличиться на скорость течения воды v . Итак, следовало бы ожидать, что

$$V - V_0 = v.$$

Так как $V - V_0$ можно определить по смещению интерференционных полос, а скорость воды v измерялась непосредственно, то опыт Физо позволял проверить эту формулу. Но опыт не подтвердил ее. Оказалось, что разность $V - V_0$ меньше v . Опыты с разными жидкостями показали, что эта разность зависит не только от v , но и от показателя преломления жидкости¹ n в соответствии с формулой

$$V - V_0 = v \left(1 - \frac{1}{n^2} \right).$$

Из этого результата следует, что предположение, согласно которому световой эфир просто участвует в движении вещества, не подтверждается. Из только что приведенной формулы получается интересное

¹Как известно, $n = \frac{\text{(Скорость света в пустоте)}}{\text{(Скорость света в среде)}}$.

следствие, что жидкость, не преломляющая свет ($n = 1$), не будет влиять на распространение света в ней даже тогда, когда она движется.

Другая простая гипотеза заключается в том, что световой эфир вообще не участвует в движении вещества (гипотеза «неподвижного» эфира). На этой гипотезе Г. А. Лоренц построил теорию электромагнитных и оптических явлений, которая не только объяснила совершенно естественным образом указанный результат опыта Физо, но и согласовывалась с результатами всех других опытов по электромагнетизму и оптике движущихся сред. Согласно этой теории, электромагнитные законы эфира не зависят от движения вещества. Вещество взаимодействует с эфиром только потому, что оно является носителем электрических зарядов, движения которых порождают электромагнитные процессы в эфире и влияют на них.

В том, что в теории Лоренца (теории неподвижного светового эфира) содержится значительная доля истины, никто из физиков не сомневался. Но одна сторона этой теории не могла не вызвать недоверия среди физиков. Поясним это ниже.

Давний опыт, не имеющий пока исключений, показывает, что физические явления зависят только от движений тел *относительно* друг друга, т. е. что с физической точки зрения *абсолютного* движения не существует. Уточним это высказывание о характере физического опыта. Там, где в физике играют роль пространственные соотношения, они всегда означают указание положения какого-нибудь предмета или признака по отношению к некоторому твердому телу. Мы описываем положение предмета по отношению к стеклянной трубке, к деревянной подставке, к стенам комнаты, к поверхности Земли и т. д. В теории место этого твердого тела занимает система координат. Она мыслится как воображаемая жесткая система, которую надо заменять реальным твердым телом во всех случаях, когда необходимо проверить правильность теоретического результата, содержащего высказывания о пространстве. Таким образом, система координат означает для физика некоторое реальное твердое тело, к которому следует относить явления, подлежащие изучению.

Возьмем теперь какой-нибудь простой закон природы, содержащий высказывания о пространстве, например, известный закон инерции Галилея: материальная точка, на которую внешние силы не действуют, движется равномерно и прямолинейно. Ясно, что этот закон не должен выполняться, если рассматривать движение в произвольно движущейся

(например, во вращающейся как угодно) системе координат. Поэтому основной закон Галилея следует формулировать так: можно выбрать систему координат K , движущуюся таким образом, что по отношению к ней всякая материальная точка, на которую не действуют никакие силы, движется прямолинейно и равномерно. Этот закон, конечно, выполняется и для всех других систем координат, покоящихся относительно K .

Если бы фундаментальный закон Галилея не выполнялся ни для одной системы координат, движущейся относительно K , то движение системы K оказалось бы выделенным из всех других движений. Это движение мы могли бы тогда считать абсолютным покоем. Однако простое рассуждение показывает, что основной закон Галилея выполняется для каждой материальной точки, на которую не действует сила не только в системе K , но и во всякой системе координат K' , движущейся равномерно и прямолинейно относительно K . Законы механики выполняются относительно таких систем K' совершенно так же, как и относительно системы K . Существует множество равномерно движущихся относительно друг друга систем координат, строго равноправных с точки зрения законов механики. Это равноправие равномерно движущихся относительно друг друга систем координат K и K' , однако, не ограничивается механикой. Как показывает опыт, оно является всеобщим. *Постулат о равноправии всех таких систем K , K' , в которых не существует состояний движения, предпочтительных по сравнению с другими, мы будем называть «специальным принципом относительности».*

Теория Лоренца вызывает недоверие именно потому, что она, по видимому, противоречит принципу относительности. Это показывает следующее рассуждение. Согласно теории Лоренца, движение вещества не сопровождается движением светового эфира. Напротив, все части эфира находятся в относительном покое. Если мы выберем систему координат K , покоящуюся относительно эфира, то эта система координат окажется выделенной из всех других систем координат K' , движущихся относительно K . Таким образом, теория не удовлетворяет принципу относительности. Это рассмотрение можно провести и не обращаясь к понятию светового эфира. По теории Лоренца существует такая система координат K , относительно которой всякий луч света распространяется в пустоте с определенной постоянной скоростью c . Если мы будем относить этот световой луч к движущейся относитель-

но K — например, в направлении распространения света — системе координат K' , то, очевидно, мы обязаны предполагать, что рассматриваемый луч света относительно K' распространяется с какой-то другой скоростью. Таким образом — в противоречии с принципом относительности — пришлось бы заключить, что система координат K является предпочтительной по сравнению со всеми движущимися относительно нее системами координат K' .

Фундаментальное утверждение теории Лоренца о том, что всякий луч света в пустоте (по крайней мере относительно одной определенной системы координат K) всегда распространяется с определенной постоянной скоростью c , мы будем называть *принципом постоянства скорости света*. Указанная выше трудность в теории Лоренца состоит в том, что принцип постоянства скорости света кажется несовместимым с принципом относительности.

Успехи теории Лоренца были настолько большими, что физики, не задумываясь, отказались бы от принципа относительности, если бы не был получен один важный экспериментальный результат, о котором мы теперь должны сказать, а именно, результат опыта Майкельсона.

Считая, в соответствии с теорией Лоренца, что существует привилегированная система координат K , в которой скорость света в пустоте равна c , уже нельзя предполагать, что Земля относительно этой системы координат покоится. В самом деле, тогда уже нельзя предполагать, что неподвижный эфир участвует в движении Земли вокруг Солнца. Следовательно, по меньшей мере часть года мы должны были бы иметь по отношению к системе K скорость порядка 30 км/сек. Отсюда возникает задача обнаружить это движение наших лабораторий и приборов относительно K , т. е. относительно эфира. Чтобы обнаружить это относительное движение, было проделано много опытов. При этом принималось во внимание, что ориентация чувствительных оптических приборов относительно направления искомого относительного движения должна оказывать влияние на оптические процессы. Однако на опыте обнаружить какое-то выделенное направление никак не удалось.

Все же большая часть этих отрицательных результатов не говорила ничего против теории Лоренца. Г. А. Лоренц в высшей степени остроумном теоретическом исследовании показал, что относительное движение в первом приближении не влияет на ход лучей при любых оптических экспериментах. Оставался только один оптический эксперимент, в ко-

тором метод был настолько чувствительным, что отрицательный исход опыта оставался непонятным даже с точки зрения теоретического анализа Г. А. Лоренца. Это был уже упомянутый опыт Майкельсона, схема которого выглядела следующим образом.

Луч света L от источника света G сначала попадает на полупрозрачное зеркало S , где он разделяется на два (см. рис. 2). Первый из них идет к зеркалу s_1 , отражается от него, снова возвращается к полупрозрачному зеркалу S и там (частично) отражается и идет в направлении E ; второй луч идет к зеркалу s_2 , отражается там и после прохождения через S также проходит в направлении E . В E оба указанных луча интерферируют. Все

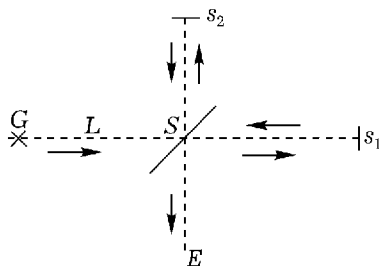


Рис. 2

описанное устройство было смонтировано на каменной плите, которая плавала в ртути, так что установка как целое могла быть ориентирована по-разному относительно направления гипотетического движения Земли в световом эфире. Согласно теории, изменение ориентации каменной плиты должно оказывать достаточно большое влияние на положение интерференционных полос в E , чтобы его можно было обнаружить. Однако эксперимент давал отрицательный результат.

Чтобы привести отрицательный результат этого эксперимента в согласие с теорией, Г. А. Лоренц и Фицджеральд выдвинули гипотезу о том, что каменная плита со всеми смонтированными на ней приборами испытывает в направлении движения Земли небольшое сокращение, как раз такое, что ожидаемый эффект компенсируется противоположным эффектом вследствие сокращения.

Способ действия, когда добиваются согласия теории с отрицательным результатом эксперимента с помощью выдвинутой специально для этого гипотезы, выглядит крайне неестественным. Напрашивается утверждение, что этому относительному движению Земли в системе K не отвечает никакая реальность, т. е. что подобное относительное движение *принципиально* нельзя обнаружить. Иными словами, мы приходим к убеждению, что принцип относительности выполняется всегда и строго. С другой стороны, как уже отмечалось, фундамент теории Лоренца, а тем самым и принцип постоянства скорости света представля-

ется несовместимым с принципом относительности. Однако каждый, кто попытался бы заменить теорию Лоренца какой-либо другой теорией, удовлетворяющей экспериментальным фактам, должен был бы признать, что это занятие при современном состоянии наших знаний является абсолютно бесперспективным.

При таком положении вещей следует еще раз задать вопрос, действительно ли теория Лоренца, или принцип постоянства скорости света, несовместима с принципом относительности. Точное исследование показывает, что оба принципа совместимы и что теория Лоренца не противоречит принципу относительности. Однако наши представления о времени и пространстве должны подвергнуться фундаментальным изменениям. Легко видеть далее, что мы должны отказаться от светового эфира. Действительно, если каждый луч света в пустоте распространяется со скоростью c относительно системы K , то световой эфир должен всюду покоиться относительно K . Но если законы распространения света в системе K' (движущейся относительно K) такие же, как и в системе K , то мы с тем же правом должны предположить, что эфир покоится и в системе K' . Так как предположение о том, что эфир покоится одновременно в двух системах, является абсурдным и так как не менее абсурдно было бы отдавать предпочтение одной из двух (или из бесконечно большого числа) физически равноценных систем, то следует отказаться от введения понятия эфира, который превратился лишь в бесполезный довесок к теории, как только было отвергнуто механистическое истолкование света.

Мы уже говорили, что система координат, как ее понимают в теоретической физике, представляет собой не что иное, как жесткое измерительное устройство, на котором с помощью твердых линеек наносятся значения пространственных координат. Мы должны теперь еще задать вопрос, какой физический смысл имеют значения времени, которые в физике обычно всегда указываются вместе со значениями координат. Рассмотрим этот вопрос.

Обычно мы измеряем время с помощью часов. При этом часами мы называем систему, которая автоматически повторяет один и тот же процесс. Число уже повторившихся процессов такого рода, причем за первый можно принять любой процесс, и есть время, измеренное часами. Показания часов, одновременные с некоторым событием, мы называем временем события, измеренным этими часами.

Пусть теперь в начале нашей системы координат ($x = y = z = 0$) помещены часы U_0 и пусть совсем рядом с началом координат происходит какое-нибудь событие. Тогда в соответствии с опытом мы можем определить показание часов, одновременное событию, иначе говоря, определить время события (отнесенное к нашим часам). Однако, если место события будет удалено от места, где расположены часы, то мы не сможем непосредственно определить показания часов, одновременные с событием. В самом деле, наблюдатель, стоящий около часов, может воспринимать событие не непосредственно, а только с помощью какого-нибудь промежуточного процесса (сигнала), связанного с событием и дошедшего до наблюдателя (например, с помощью лучей света). Наблюдатель определит только время прибытия сигнала, а не время события. Последнее он сможет определить, только зная промежуток времени, проведенный сигналом в пути. Однако определить этот промежуток времени с помощью часов U_0 , установленных в начале координат, принципиально невозможно. С помощью часов можно непосредственно определять время только таких событий, которые происходят в непосредственной близости от часов.

Если бы на месте, где произошло событие, также находились часы U_1 — мы будем предполагать, что эти часы точно такой же конструкции, как и часы U_0 , — и если бы там стоял наблюдатель, определяющий время события по указанным часам, то это тоже еще не помогло бы нам, ибо мы еще не могли бы сопоставить показаниям часов U_1 одновременные им показания часов U_0 . Отсюда очевидно, что для определения времени необходимо еще *физическое определение одновременности*. Как только оно будет дано, искомое физическое определение времени будет полным.

Другими словами, требуется еще правило, по которому часы U_1 можно синхронизировать с часами U_0 . Мы будем делать это следующим образом. Пусть мы имеем какое-нибудь средство, чтобы посылать сигналы из начала координат O системы K в точку E и обратно из E в O так, что сигналы $O - E$ и $E - O$ физически совершенно равноценны. Тогда мы можем и будем требовать, чтобы часы U_0 и U_1 были поставлены так, чтобы на прохождение обоими сигналами своих путей требовалось одно и то же время, измеренное этими часами. Пусть t_0 — время отправления сигнала $O - E$ (по часам U_0), t_1 — время прибытия сигнала $O - E$ (по часам U_1), t'_1 — время отправления сигнала $E - O$ (по часам U_1), t'_0 — время прибытия сигнала $E - O$ (по часам U_0). Тогда

часы U_1 должны быть поставлены так, чтобы выполнялось условие

$$t_1 - t_0 = t'_0 - t'_1.$$

Теперь мы можем расположить в произвольных точках системы координат K такие часы и поставить их по часам U_0 в соответствии с указанным правилом. Тогда можно определять время событий во всех этих точках.

При указанном определении одновременности событий необходимо обратить особое внимание на следующее. Мы использовали для определения времени *систему часов, покоящихся относительно системы K* . Иначе говоря, это определение имеет смысл только по отношению к системе координат K в определенном состоянии движения. Если кроме системы координат K вводится другая система координат K' , движущаяся равномерно и прямолинейно относительно K , то можно совершенно аналогично определить время относительно K' . Однако заранее не очевидно, что можно согласовать показания этих двух систем часов. Априори ниоткуда не следует, что два события, одновременные относительно K , должны быть одновременными относительно системы K' . В этом и заключается «относительность времени».

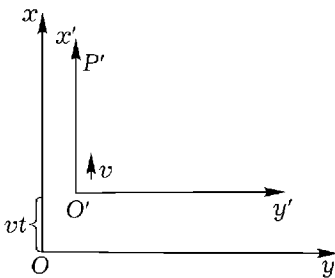


Рис. 3

Оказывается, что принцип постоянства скорости света и принцип относительности противоречат один другому только до тех пор, пока сохраняется постулат абсолютного времени, т.е. абсолютный смысл одновременности. Если же допускается относительность времени, то оба принципа оказываются совместимыми; в этом случае, исходя из этих двух принципов, получается теория, называемая «теорией относительности».

Основная задача, связанная с этой системой понятий, заключается в следующем. Даны две системы координат K и K' . Система K' движется равномерно и прямолинейно относительно K со скоростью v . Даны место и время произвольного события (т.е. координаты x, y, z и время t) в системе K . Требуется найти место и время (x', y', z', t') в системе K' . При этом положения координатных осей этих двух систем для простоты выбраны так, как показано на рис. 3. Старая кинематика решала эту задачу следующими

формулами:

$$x' = x - vt,$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

$$t' = t.$$

Последняя из этих формул выражает постулат о том, что значения времени имеют смысл, независимый от состояния движения (постулат «абсолютного времени»). Однако в этих уравнениях содержится еще одна неявная предпосылка, с которой мы теперь познакомимся. На рис. 3 изображено положение и состояние движения двух систем K и K' с точки зрения системы K . Возьмем теперь точку P' на оси x' , расстояние которой от O' равно l' . Это значит, что наблюдатель, движущийся вместе с системой K' , должен приложить свою измерительную линейку вдоль оси x' l' раз, чтобы попасть из O' в P' . Наблюдатели же, находящиеся в покое относительно системы K , чтобы определить расстояние $O'P'$, должны поступать иначе. Они должны определить те пространственные точки в системе K , в которых находятся точки O' и P' в одно и то же время (системы K). Затем, прикладывая измерительную линейку вдоль оси x системы K , они получают искомое расстояние между этими точками. Очевидно, оба процесса абсолютно разные, так что и их численные результаты l и l' априори могут быть разными. Другими словами, априори нельзя отвергать возможность, что и понятие пространственного расстояния имеет только относительный смысл. Таким образом, наряду с «относительностью времени» мы должны допустить также «относительность длин».

Тем самым рушится основа написанных выше уравнений преобразования пространственных координат и времени. Вместо этих уравнений в теории относительности появляются преобразования, удовлетворяющие одновременно принципу относительности и принципу постоянства скорости света. Новые уравнения преобразования находят, математически формулируя требование, чтобы каждый луч света распространялся в обеих системах K и K' с одинаковой скоростью c . Так получают уравнения преобразования

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}},$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

$$t' = \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}.$$

Последнее из этих уравнений показывает, что в общем случае из равенства значений времени (одновременности) двух событий в системе K не следует равенство значений времени (одновременность) тех же событий в системе K' . Одновременность, таким образом, теряет абсолютный смысл.

Далее, возникает вопрос: чему равна в системе K длина l стержня, покоящегося в системе K' , ориентированного параллельно оси x' и обладающего длиной l' в системе K' ? Первое из указанных уравнений преобразования дает ответ¹:

$$l = l' \sqrt{1 - (v^2/c^2)}.$$

Это означает следующее. Если стержень в покое обладает длиной l' , то при движении со скоростью v вдоль своей оси он будет обладать с точки зрения несопутствующего наблюдателя меньшей длиной $l = l' \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$, тогда как для сопутствующего наблюдателя длина стержня, как и прежде, равна l' . Длина тем меньше, чем больше скорость v движущегося стержня. Если v приближается к скорости света, то длина стержня стремится к нулю. Для значений v , превышающих скорость света, наш результат теряет смысл; движение с такими скоростями, согласно теории относительности, невозможно. Легко видеть, что упомянутая выше гипотеза Г. А. Лоренца и Фицджеральда, выдвинутая для объяснения опыта Майкельсона, получается как следствие теории относительности. С другой стороны, согласно этой теории, тело, покоящееся относительно K , с точки зрения K' испытывает точно такое же сокращение, как и тело, покоящееся в K' , при наблюдении его из системы K .

Еще одно важное следствие из уравнений преобразования получается следующим образом. Пусть в начале координат системы K' нахо-

¹Для обоих концов линейки, именно для их координат x , выполняются уравнения

$$x'_1 = \frac{x_1 - vt}{1 - (v^2/c^2)}, \quad x'_2 = \frac{x_2 - vt}{1 - (v^2/c^2)},$$

откуда после вычитания следует

$$x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - x_1}{1 - (v^2/c^2)} \quad \text{или} \quad l = l' \sqrt{1 - (v^2/c^2)}.$$

дятся часы с секундной стрелкой. Для них всегда $x' = 0$, и они отсчитывают свои секунды в моменты времени $t' = 0, 1, 2, 3$ и т. д. Первое и четвертое уравнения преобразования дают для времен t этих секундных отсчетов значения

$$t = \frac{0}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}, \quad \frac{1}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}, \quad \frac{2}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}$$

и т. д. Таким образом, в системе K время между отсчетами часов равно $1/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$, т. е. больше секунды. Часы, движущиеся со скоростью v , идут — с точки зрения несопутствующей системы координат — медленнее, чем шли бы те же часы, если бы они покоились.

Обобщая, можно сделать вывод: всякий процесс в некоторой физической системе замедляется, если эта система приводится в поступательное движение. Однако это замедление происходит только с точки зрения несопутствующей системы координат.

Представляет ли теория относительности какую-либо ценность для дальнейшего развития физики, помимо того, что решает изложенную выше дилемму? На этот вопрос следует ответить утвердительно по следующей причине. Согласно теории относительности, системы K и K' являются равноправными, и координаты и значения времени в обеих системах взаимно связаны приведенными выше уравнениями преобразования. Если какая-нибудь общая физическая теория формулируется в системе K , то с помощью уравнений преобразования вместо величин x, y, z, t в уравнения можно ввести величины x', y', z', t' . Тогда получится система уравнений, отнесенная к системе K' . В соответствии с принципом относительности эта система уравнений должна точно совпадать с системой уравнений, отнесенной к системе K , с той лишь разницей, что вместо величин x, y, z, t войдут x', y', z', t' . Таким образом, теория относительности дает общий критерий допустимости любой физической теории.

Перечислим кратко отдельные результаты, полученные до настоящего времени благодаря теории относительности. Она дает простую теорию принципа Доплера, абберации, опыта Физо. Она говорит о справедливости уравнений поля Максвелла–Лоренца и для электродинамики движущихся тел. Законы отклонения быстрых катодных лучей и одинаковых с ними по природе β -лучей радиоактивных веществ, вообще законы движения быстро движущихся материальных частиц выводятся с помощью теории относительности без привлечения особых дополнительных гипотез.

Однако важнейший результат, достигнутый пока теорией относительности, — это вывод соотношения между инертной массой физической системы и содержанием энергии в ней. Пусть тело обладает в некотором определенном состоянии инертной массой M . Если этому телу сообщается каким-то образом энергия E , то, согласно теории относительности, его инертная масса возрастает вследствие этого до значения $M + \frac{E}{c^2}$, где c — скорость света в пустоте. Поэтому закон сохранения массы, считавшийся до сих пор справедливым, видоизменяется и объединяется в один закон с законом сохранения энергии. Этот результат говорит о том, что инертную массу M тела следует понимать как содержание энергии Mc^2 . Прямого экспериментального подтверждения этого важного результата у нас пока нет, однако мы знаем частные случаи, для которых справедливость «закона инерции энергии» можно доказать, не прибегая к теории относительности.

Развитие теории относительности было сильно ускорено благодаря математической формулировке ее основ, данной Г. Минковским. При этом Минковский исходил из того, что «временная координата» будет входить в основные уравнения теории относительности точно таким же образом, как и пространственные координаты, если вместо t ввести пропорциональную этой величине мнимую переменную $\sqrt{-1}ct$. Благодаря этому уравнения теории относительности становятся уравнениями в четырехмерном пространстве; при этом формальные свойства этого четырехмерного мира отличаются от формальных свойств пространства евклидовой геометрии только числом измерений.

II. Общая теория относительности

Специальная теория относительности основана на идее, что определенные системы координат (инерциальные системы) являются равноправными для формулировки законов природы; к таким системам координат принадлежат те, в которых выполняется закон инерции и закон постоянства скорости света в пустоте. Но являются ли эти системы координат на самом деле выделенными в природе, или же эта привилегированность возникает вследствие несовершенного понимания законов природы? Конечно, закон Галилея на первый взгляд выделяет инерциальные системы из всех других движущихся систем координат.