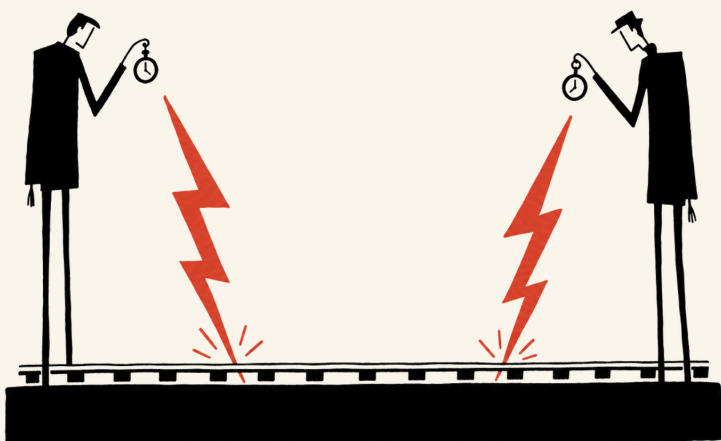


О специальной и общей теории относительности



Albert Einstein · 1917

Иллюстрированные аудиолекции

Lecturized

О специальной и общей теории относительности

Иллюстрированные аудиолекции

Albert Einstein · 1917

Пересказано в иллюстрированных лекциях Lecturized
lecturized.com

По оригиналу: Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie
(Gemeinverständlich)

Содержание

Когда теорема истинна?

Где облако?

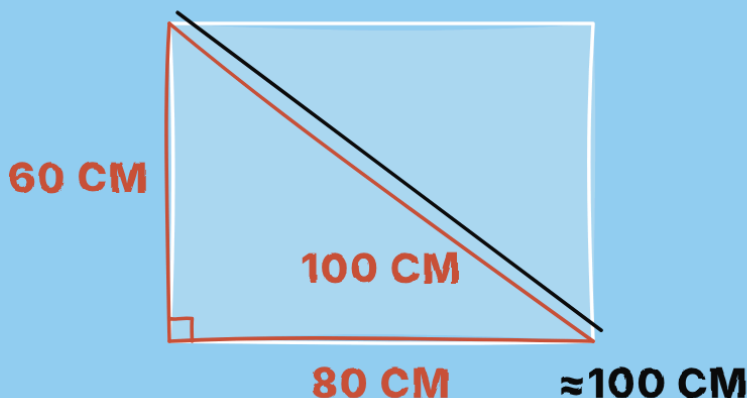
Один камень, две траектории

Какие тела отсчёта допустимы?

Когда теорема истинна?

Возьмите рулетку и подойдите к кухонному столу. Измерьте короткую сторону и длинную, затем протяните рулетку из угла в угол, но прежде чем читать число, угадайте ответ с помощью единственной теоремы, которую все помнят со школы, той, что о длинной стороне прямоугольного треугольника. Если стороны были шестьдесят и восемьдесят сантиметров, школьное правило говорит, что диагональ равна ста. Вы смотрите на рулетку, и вот оно, плюс-минус миллиметр. Что именно вы только что подтвердили?

ЧТО ЗНАЧИТ «ИСТИННО»?

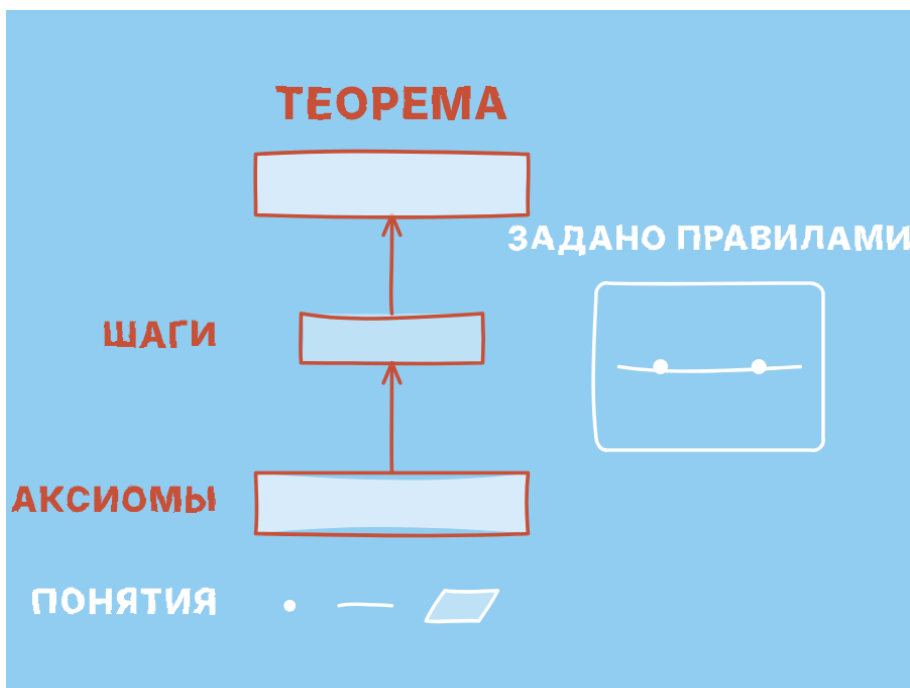


$$60^2 + 80^2 = 100^2$$

Предсказание диагонали стола

Большинство сказало бы, что проверили, что теорема истинна. Альберт Эйнштейн открывает свою небольшую книгу тем, что останавливает нас ровно здесь и спрашивает, не без лукавства, что мы имеем в виду, называя такое утверждение истинным. Он напоминает, что большинство из нас познакомились с гордым зданием геометрии Евклида детьми, когда добросовестные учителя гоняли нас по его высоким лестницам, и вспоминаем его с большим уважением, чем любовью. Из верности той школе мы отнеслись бы с презрением к любому, кто усомнился бы в самой скромной из её теорем; и всё же наша уверенность может испариться, едва кто-нибудь спросит, что значит «истинно».

Представьте геометрию как здание. Его фундамент — несколько основных понятий, точка, прямая, плоскость, и несколько простых утверждений о них, аксиом, которые мы принимаем, потому что они кажутся очевидными. Каждый этаж выше строится на фундаменте логическими шагами, и этот процесс строительства и есть доказательство. Итак, внутри геометрии теорема истинна, когда она правильно надстроена над аксиомами, и ничего другого это слово там означать не может. Истинен ли сам фундамент — вопрос, на который геометрия ответить не может, и Эйнштейн говорит, что он вовсе лишён смысла.

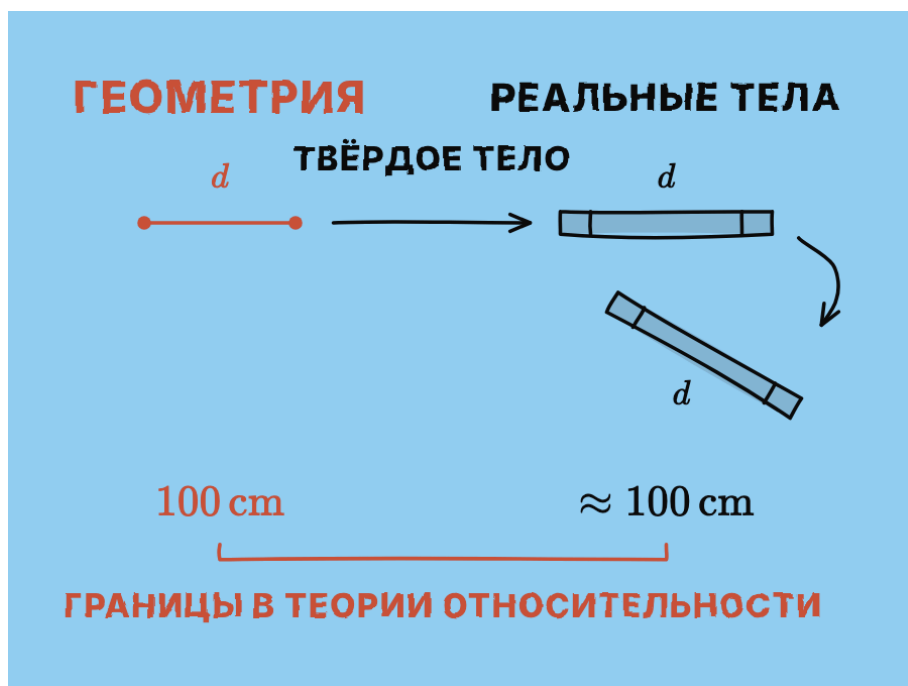


Что устанавливает доказательство

Вот почему. Истинно ли, что через две точки проходит только одна прямая? Геометрия не знает; она просто имеет дело с вещами, которые называет прямыми, и наделяет их этим свойством по определению, как правила шахмат дают слону ход по диагонали. Никто не спрашивает, истинен ли ход слона. А «истинный», говорит Эйнштейн, всегда означает согласие с какой-то реальной вещью, тогда как чистая геометрия лишь о том, как её собственные понятия складываются друг с другом.

Отчего же тогда теорема кажется за столом такой истинной? Оттого, что понятия геометрии изначально выросли из реальных предметов. Мы привыкли видеть в отрезке две метки на твёрдом теле, рулетке, линейке, стержне, и считать три предмета

стоящими в линию, когда, закрыв один глаз, можем заставить ближний закрыть остальные. Эта привычка и есть мост, и Эйнштейн делает её явной одной добавленной фразой: две метки на практически твёрдом теле остаются на одном расстоянии друг от друга, как бы вы ни перемещали тело. Ничего такого в чистой геометрии нет; это утверждение о рулетках и стержнях. Как только оно добавлено, каждая теорема геометрии становится утверждением о том, как могут располагаться реальные твёрдые тела, и геометрия стала разделом физики.



От геометрии к физической проверке

Теперь слово «истинный» подходит, потому что теперь есть что проверять. Теорема истинна, в этом физическом смысле, когда с ней согласно построение из реальных вещей, циркулем и

линейкой или рулеткой на столешнице. Ваш стол был такой проверкой, и она пройдена. Та же проверка делается, в большом масштабе, всякий раз, когда ваш телефон определяет своё положение: приёмник превращает измеренные расстояния до нескольких спутников в место на карте с помощью обычной геометрии, и метод считается верным потому, что место совпадает с тем, где вы на самом деле.

Эйнштейн заканчивает оговоркой, которая проходит через всю книгу. Убеждённость в том, что геометрия истинна в этом смысле, покоится на довольно несовершенном опыте; ни одна рулетка не бывает совершенно твёрдой, ни один глаз — совершенно прямым. Пока, говорит он, мы принимаем эту истинность как данность, а в конце книги, в общей теории относительности, увидим, что у неё есть границы, и где они проходят.

Запомним

Внутри чистой геометрии теорема истинна лишь потому, что следует из аксиом, а вопрос об истинности аксиом там лишён смысла, как вопрос, истинен ли ход слона в шахматах. Теоремы кажутся истинными, потому что понятия геометрии выросли из реальных предметов, и мы видим в отрезке две метки на твёрдом теле. Добавьте одно физическое утверждение, что две метки на твёрдом теле сохраняют расстояние между собой, как бы тело ни перемещали, и геометрия станет разделом физики. Тогда теорема истинна, когда с ней согласны реальные тела, рулетка на столе или спутниковый приёмник. Это согласие покоится на несовершенном опыте и пока принимается как данность; его границы проявятся в общей теории относительности.

Вопросы

1. Внутри самой геометрии, что делает теорему истинной?
 - a. То, что рулетка на столе с ней согласна
 - b. То, что она правильно надстроена над аксиомами логическими шагами
 - c. То, что всякий, кто о ней подумает, находит её очевидной
2. Почему лекция сравнивает аксиому о прямых с ходом слона в шахматах?

- a. Потому что и то и другое трудно выучить
 - b. Потому что и то и другое — правила, заданные по определению, так что спрашивать, истинны ли они, бессмысленно
 - c. Потому что и то и другое найдено тщательным измерением
 - d. Потому что и то и другое можно проверить линейкой
3. Какое одно добавленное утверждение превращает геометрию в раздел физики?
- a. Что две метки на практически твёрдом теле остаются на одном расстоянии, как бы тело ни перемещали
 - b. Что аксиомы подтверждаются опытом
 - c. Что спутниковый приёмник находит положение с помощью геометрии
 - d. Что прямая — кратчайший путь между двумя точками
4. Почему Эйнштейн принимает физическую истинность геометрии лишь пока?
- a. Потому что ещё не все теоремы доказаны
 - b. Потому что рулетки редко бывают точными
 - c. Потому что она покоится на несовершенном опыте, а общая теория относительности покажет её границы

Ответы

1. **b)** Представьте геометрию как здание: внутри него теорема истинна, когда она правильно надстроена над аксиомами, и ничего другого это слово там означать не может.

2. б) Геометрия просто имеет дело с вещами, которые называет прямыми, и наделяет их свойством по определению, как правила шахмат дают слону его ход; никто не спрашивает, истинен ли ход слона.

3. а) Как только мы добавляем, что две метки на твёрдом теле сохраняют расстояние, как бы тело ни перемещали, каждая теорема становится утверждением о том, как могут располагаться реальные твёрдые тела, и геометрия стала разделом физики.

4. с) Убеждённость покоится на довольно несовершенном опыте, ни одна рулетка не совершенно тверда и ни один глаз не совершенно прям; он принимает её пока и в конце книги показывает, где у неё границы.

Задачи

1. Приятель говорит: «Теорема Пифагора верна, я проверил её рулеткой». В каком смысле он прав, а в каком не проверил ровно ничего?

Подсказка: Отделите теорему как нечто, построенное из аксиом, от теоремы как утверждения о рулетке на столе.

Ответ: В физическом смысле он прав: как только мы добавили, что рулетка — твёрдое тело, метки которого сохраняют расстояние, теорема стала утверждением о реальных вещах, и стол с ней согласился. Внутри чистой геометрии он не проверил ничего, потому что там теорема истинна лишь тем, что надстроена над аксиомами, и никакое измерение к этому не относится.

2. Объясните на сравнении с шахматами, почему вопрос, проходит ли через две точки только одна прямая, даже нельзя задать, тогда как вопрос, совпадает ли измеренная диагональ с предсказанной, задать можно.

Подсказка: Спросите, о чём каждый вопрос: о правилах или о реальных вещах.

Ответ: Первое — правило геометрии: прямые — это вещи, обладающие этим свойством по определению, как слон ходит по диагонали по правилам шахмат, а спрашивать, истинно ли правило, бессмысленно. Второе — о метках на рулетке и столешнице, реальных вещах, так что согласие или несогласие с ними можно проверить, и слово «истинно» подходит.

3. Почему лекция называет привычку видеть в отрезке две метки на твёрдом теле мостом, и что Эйнштейн строит на этом мосту?

Подсказка: Подумайте о том, что связывает понятия геометрии с рулетками и стержнями.

Ответ: Привычка связывает понятия геометрии, которые произошли от реальных предметов, обратно с этими предметами. Эйнштейн делает её явной одним добавленным утверждением, что две метки на практически твёрдом теле сохраняют расстояние, как бы тело ни перемещали; с ним геометрия становится разделом физики, теоремы которого можно проверять на реальных телах.

Где облако?

Измерьте высоту двери короткой деревянной линейкой.

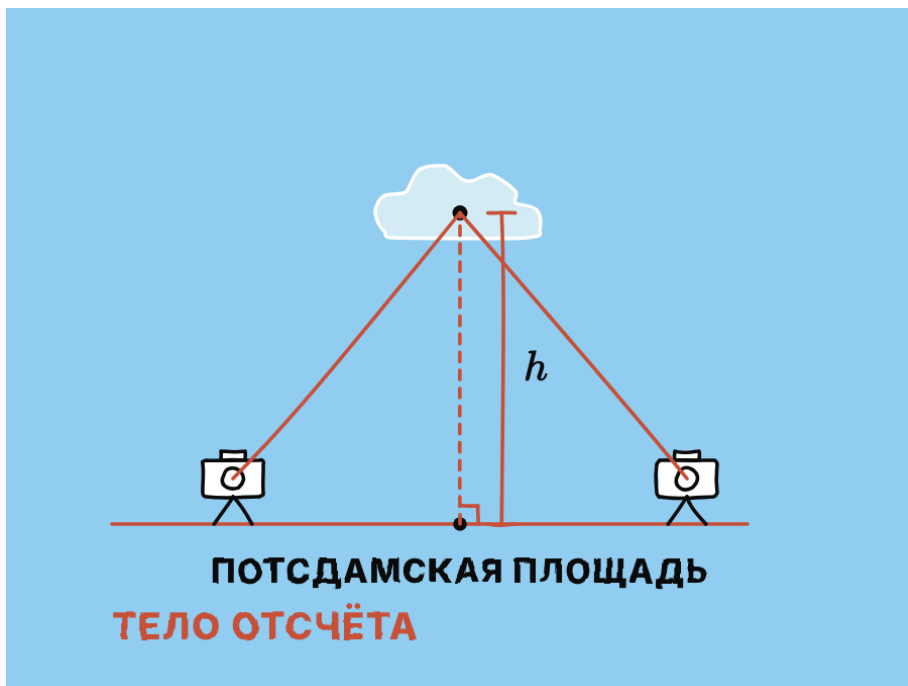
Поставьте её на пол у косяка, отметьте большим пальцем, где она кончается, поднимите, поставьте на отметку и считайте: одна, две, три длины линейки и немного. Этому вас никто не учил; это просто и есть измерение. Теперь взгляните на облако, плывущее над домом, и спросите, как бы вы измерили, где оно, той же линейкой. Эйнштейн использует этот вопрос, чтобы показать, что мы на самом деле делаем всякий раз, когда говорим, где что-то находится.



Расстояние — это повторённые единицы

Сначала линейка. В прошлый раз мы договорились, что отрезок — это две метки на твёрдом теле; теперь выберите один такой отрезок, небольшой стержень, и условьтесь раз и навсегда пользоваться им как единицей. Чтобы измерить расстояние между двумя точками твёрдого тела, укладывайте единичный стержень вдоль прямой между ними снова и снова и считайте, сколько раз он уместился. Этот счёт и есть расстояние. Всякая рулетка и всякий лазерный дальномер сводятся, в конце концов, к этому счёту повторяемой единицы.

Теперь вопрос «где». Всякое указание, где что-то находится, говорит Эйнштейн, называет точку некоторого твёрдого тела, с которой эта вещь совпадает. Это твёрдое тело — тело отсчёта, и повседневная речь устроена так же, как наука. Скажите «в Берлине, на Потсдамской площади»: поверхность Земли — твёрдое тело, Потсдамская площадь — именованная точка на ней, и событие находится в этой точке. Это как сказать другу, что вы встретитесь у фонтана в парке: парк — тело отсчёта, а фонтан — его именованная точка.



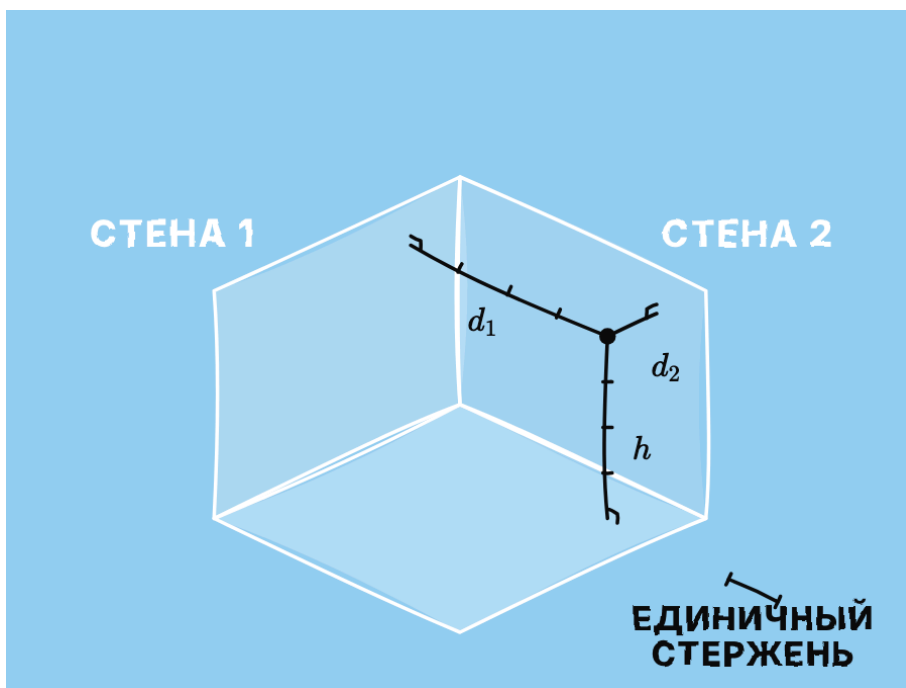
Дотянуться до облака

У этого способа указывать место два ограничения. Он может называть только места на поверхности твёрдого тела, и ему нужно, чтобы на этой поверхности были приметы с названиями. У облака нет ни того, ни другого. Так что представьте себе шест, поставленный на площади вертикально и достаточно высокий, чтобы коснуться облака. Длина шеста, измеренная единичным стержнем, вместе с местом его основания полностью говорит, где облако. По существу ничего не изменилось: мы по-прежнему называем точку твёрдого тела, только твёрдое тело теперь дотягивается до облака.

В этом шесте скрыты три шага, и Эйнштейн извлекает их. Тело отсчёта продолжено так, чтобы достичь предмета, который

нужно локализовать. Число, длина шеста, заменило именованную примету. И мы говорим о высоте облака даже тогда, когда никакого шеста не построено: сфотографируйте облако с нескольких мест на земле и по снимкам, зная, как распространяется свет, вычислите, какой длины должен был бы быть шест. Шест воображаемый, но его длина всё равно измерена.

Отсюда Эйнштейн выводит урок, что места выгодно описывать измеренными числами, а не именованными приметами. Физика делает это с помощью системы координат: представьте две стены и пол, сходящиеся в углу комнаты, три плоские жёсткие поверхности под прямыми углами, соединённые в одно твёрдое тело. Любая точка в комнате задана тремя расстояниями: как далеко она от одной стены, от другой стены и над полом. Эти три числа — её координаты, и каждое находится, в принципе, укладыванием единичного стержня вдоль перпендикуляра к стене.



Три расстояния задают точку

Опыт

Встаньте в угол своей комнаты и выберите лампу или крючок для картины. Скажите, как далеко он от одной стены, как далеко от другой и как высоко над полом: три счёта линейкой, и его место задано без единой приметы. Передвиньте предмет, и изменятся только три числа; стены останутся какими были.

На практике, признаёт Эйнштейн, никто не строит три стенки, а координаты почти никогда не находят стержнями; их находят косвенно. Спутниковый приёмник никогда не прикладывает

стержень ни к чему: он измеряет, сколько времени шли сигналы от нескольких спутников, и вычисляет по этим временам три координаты, точно так же, как высоту облака вычислили по снимкам. И всё же смысл каждого такого указания должен оставаться тем, что мы только что описали, стержнями, приложенными к твёрдому телу, иначе, предупреждает он, результаты физики и астрономии расплывутся в неясность.

Итак, всякое описание того, где что находится, пользуется твёрдым телом, к которому вещи относятся, и предполагает, что обычная школьная геометрия верна для отрезков, двух меток на твёрдом теле. Допущение, которое мы в прошлый раз приняли условно, теперь несёт на себе всю идею места.

Запомним

Расстояние измеряется укладыванием выбранного единичного стержня вдоль прямой между двумя точками и счётом, сколько раз он уместился. Сказать, где что-то находится, значит назвать точку твёрдого тела отсчёта, с которой оно совпадает, как фонтан называет точку в парке. Понятие места уточняется продолжением тела отсчёта, заменой примет измеренными числами и разговором о длине даже тогда, когда стержень, который её измерил бы, лишь воображаем. Система координат делает это систематическим: три жёсткие стенки под прямыми углами, и три расстояния от точки до них — её координаты. Найдено ли место стержнями или вычислено по спутниковым сигналам, указание места означает именно это и предполагает, что школьная геометрия верна для отрезков на твёрдых телах.

Вопросы

1. Из чего, по лекции, на самом деле состоит измерение расстояния между двумя точками?
 - а. Из укладывания единичного стержня вдоль прямой между ними и счёта, сколько раз он уместился
 - б. Из измерения времени прохождения сигнала от одной точки до другой
 - с. Из счёта именованных примет между двумя точками

2. Что общего у «встретимся у фонтана в парке» и «в Берлине, на Потсдамской площади»?
- a. Оба задают место тремя измеренными числами
 - b. Оба называют точку твёрдого тела отсчёта, с которой событие совпадает
 - c. Обоим нужен поставленный шест, чтобы работать
 - d. Оба локализуют что-то вне поверхности Земли
3. Высоту облака вычисляют по снимкам, сделанным с нескольких мест на земле. Какой из трёх шагов это?
- a. Продолжение тела отсчёта настоящим шестом до облака
 - b. Замена приметы числом
 - c. Разговор о длине, хотя стержень, который её измерил бы, так и не построен
 - d. Обращение с облаком как с приметой на поверхности Земли
4. Почему Эйнштейн настаивает, что даже положение спутникового приёмника должно означать стержни, приложенные к твёрдому телу?
- a. Потому что спутниковые сигналы менее точны, чем стержни
 - b. Потому что иначе результаты физики и астрономии расплывутся в неясность
 - c. Потому что три стенки системы координат на практике всегда построены

Ответы

- 1. а)** Укладывают единичный стержень вдоль прямой между точками снова и снова и считают, сколько раз он уместился; этот счёт и есть расстояние, и всякая рулетка и дальномер сводятся к нему.
- 2. б)** Всякое указание, где что-то находится, называет точку твёрдого тела, с которой вещь совпадает; парк — тело отсчёта, а фонтан — его именованная точка, как поверхность Земли и Потсдамская площадь.
- 3. в)** Мы говорим о высоте облака даже тогда, когда никакого шеста не построено: по снимкам, зная, как распространяется свет, вычисляют, какой длины должен был бы быть шест, так что шест воображаемый, но длина измерена.
- 4. б)** Координаты находят косвенно, как высоту облака по снимкам, но смысл каждого такого указания должен оставаться стержнями, приложенными к твёрдому телу, иначе результаты физики и астрономии расплывутся в неясность.

Задачи

- 1.** В комнате висит лампа. Приняв за систему координат угол, где две стены сходятся с полом, объясните своими словами, что такое её три координаты и как в принципе можно измерить каждую.

Подсказка: Представьте две стены и пол как три жёсткие поверхности и спросите, как далеко лампа от каждой.

Ответ: Две стены и пол — три плоские жёсткие поверхности под прямыми углами, соединённые в одно твёрдое тело. Координаты лампы — её три расстояния: от одной стены, от другой и над полом. Каждое находится, в принципе, укладыванием единичного стержня вдоль перпендикуляра к этой поверхности и счётом, сколько раз он уместился.

- 2.** Назовите два ограничения указания места по примете и объясните, как шест на площади освобождает нас от каждого, не

меня того, что такое указание места.

Подсказка: Начните с того, что может и чего не может указать «у фонтана в парке».

Ответ: Примета может называть только места на поверхности твёрдого тела, и ей нужно, чтобы на этой поверхности были именованные приметы. Шест продолжает твёрдое тело вверх, так что можно задать место вне поверхности; а измеренная длина шеста, число, заменяет примету. Указание по-прежнему называет точку твёрдого тела, с которой облако совпадает, так что его род не изменился.

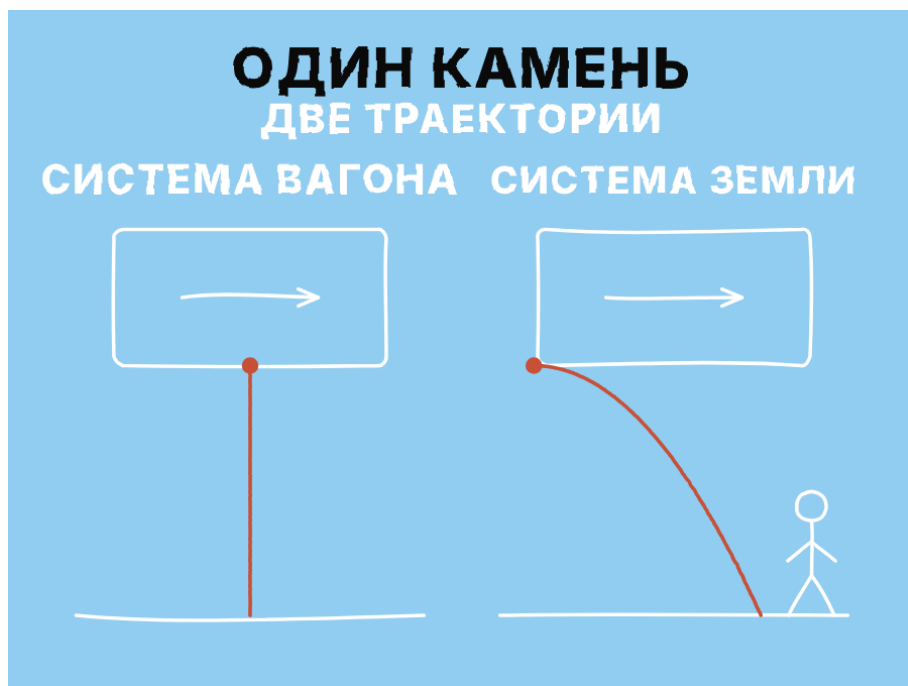
3. Спутниковый приёмник вычисляет своё положение по временам прохождения сигналов и никогда не касается стержня. В каком смысле его ответ всё же является указанием места того рода, что описан здесь, и что он предполагает о геометрии?

Подсказка: Сравните его с облаком, высоту которого вычислили по снимкам.

Ответ: Приёмник находит свои координаты косвенно, как высоту облака нашли по снимкам, но их смысл по-прежнему — три расстояния до твёрдого тела отсчёта, расстояния, которые в принципе мог бы измерить стержень. Как и всякое указание места, он предполагает, что школьная геометрия верна для отрезков, двух меток на твёрдом теле.

Один камень, две траектории

Сядьте у окна поезда, плавно идущего по прямому пути. Высуньте камень в окно и отпустите его, без толчка. Вы видите, как он падает отвесно, словно поезд стоит, и ложится на насыпь под вами. Пешеход на тропинке у путей видит, как тот же камень покидает ту же руку, но для пешехода он падает по кривой, увлекаемый вперёд вместе с поездом, пока падает, и ложится далеко впереди того места, где был отпущен. Один камень, два честных свидетеля, две разные траектории.



Один камень, два тела отсчёта

Эйнштейн открывает этот параграф признанием. Если бы он сказал, что механика описывает, как тела со временем меняют своё место в пространстве, он грешил бы, по его словам, против святого духа ясности. Беда прячется в двух коротких словах, «место» и «пространство», и камень выводит её на свет. Лежат ли места, которые проходит камень, на самом деле на прямой или на кривой? И что значит сказать, что камень движется «в пространстве»?

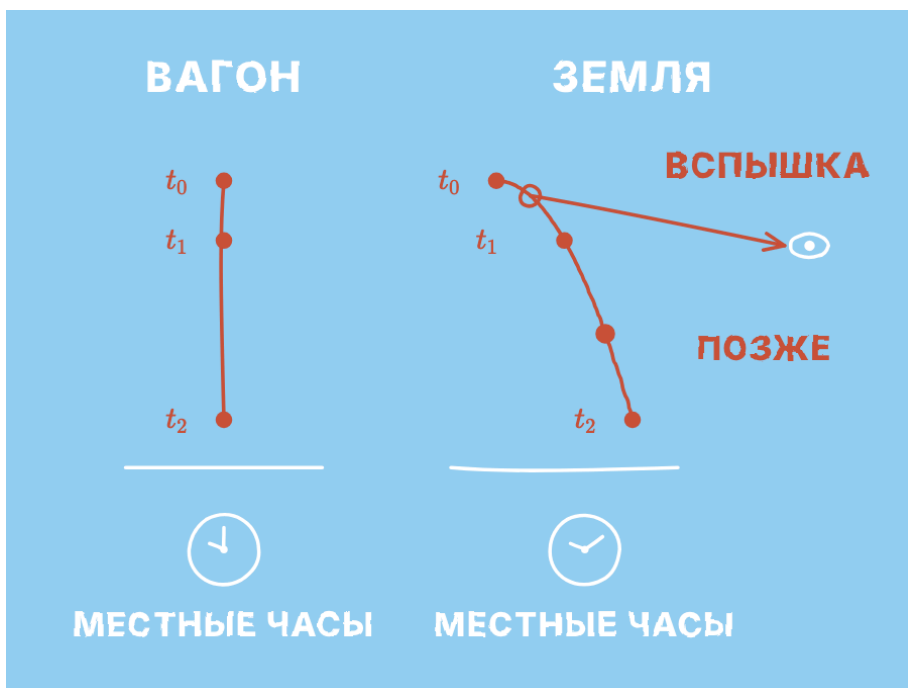
После прошлого раза ответ ясен. «Пространство», если быть честными, слово, с которым мы не связываем никакого ясного представления, так что Эйнштейн его отбрасывает и говорит вместо этого «движение относительно твёрдого тела отсчёта». Места относительно тела отсчёта — ровно то, что мы научились задавать в прошлый раз, и здесь предлагаются два тела отсчёта: вагон и земля. Относительно вагона камень падает по прямой; относительно земли — по кривой. Ни одна из них не настоящая при другой иллюзорной. Траектории самой по себе нет, есть лишь траектория относительно определённого тела отсчёта, а фраза, в которой тело отсчёта опущено, ничего не говорит.

Опыт

В следующий раз, когда вы поедете в машине по прямой ровной дороге, уроните монету из руки себе на колени. Она падает отвесно и ложится вам на колени, а не позади вас. Теперь представьте кого-то на тротуаре, кто смотрит через окно: монета всё время падения движется вперёд вместе с машиной, вычерчивая пологую дугу. Правы оба; вы просто выбрали разные твёрдые тела, машину или дорогу, к которым относите места монеты.

Спутниковый приёмник живёт по тому же правилу. Он сообщает ваше движение относительно поверхности Земли, так что пассажир, глядящий на него в поезде, видит сто километров в час, сидя совершенно неподвижно относительно вагона. Ни одно из чисел не ошибочно; каждое принадлежит своему телу отсчёта.

Траектория с названным телом отсчёта — ещё не вся история движения. Нужно ещё сказать, когда камень находится в каждой точке траектории, и эти времена, настаивает Эйнштейн, должны быть тем, что можно измерить, а не числами, взятыми из воздуха. Он делает это просто: двое совершенно одинаковых часов, одни в руке пассажира, другие в руке пешехода, и каждый отмечает, где камень на его собственном теле отсчёта при каждом тике его собственных часов. Тик, здесь; тик, там; и список мест в паре с тиками есть полное описание движения относительно этого тела отсчёта.



Места в паре с показаниями часов

Эйнштейн заканчивает двумя тихими предостережениями, отложенными на потом. Сопоставление тика с местом не учитывает, что свету нужно время, чтобы дойти, так что пешеход видит камень там, где тот был мгновение назад; и таится вторая трудность, которую он пока не называет. Они не малы: спутниковые часы, питающие ваш приёмник, уходили бы на километры в день, если бы такими вещами пренебрегли, и остальная часть книги — рассказ о том, как принять их всерьёз. Так что этот отрезок книги останавливается там, где останавливается рассуждение Эйнштейна: геометрия, ставшая реальной благодаря твёрдым телам, места, заданные стержнями относительно тела отсчёта, и движение, существующее лишь относительно тела отсчёта и часов.

Запомним

«Движение в пространстве» ничего не значит, пока расплывчатое слово «пространство» не заменено твёрдым телом отсчёта. Камень, уроненный из поезда, падает отвесно относительно вагона и по кривой относительно земли, и ни одна траектория не реальнее другой. Траектории самой по себе нет, есть лишь траектория относительно определённого тела отсчёта. Полное описание движения требует ещё времени в каждой точке, взятого с часов в руке наблюдателя и сопоставленного с местом камня на его собственном теле отсчёта. Две трудности отложены, время хода света и вторая, ещё не названная, и остальная часть книги берётся за них.

Вопросы

1. Камень падает отвесно для пассажира и по кривой для пешехода. Какая траектория настоящая?
 - а. Кривая, потому что земля покоится, а поезд движется
 - б. Прямая, потому что камню не придали толчка
 - с. Ни та, ни другая: траектория существует лишь относительно выбранного тела отсчёта
2. Почему Эйнштейн отбрасывает слово «пространство» и говорит о движении относительно твёрдого тела отсчёта?
 - а. Потому что с «пространством» мы не связываем никакого ясного представления, а места относительно

- тела отсчёта были определены в прошлый раз
- b. Потому что пространство искривлено и его нельзя измерить стержнями
 - c. Потому что поезд и земля движутся в пространстве с разными скоростями
 - d. Потому что твёрдые тела легче представить, чем пустое пространство
3. Траектория с названным телом отсчёта — ещё не вся история движения. Чего не хватает?
- a. Веса камня и силы тяжести
 - b. Того, когда камень находится в каждой точке траектории, заданного как нечто измеримое
 - c. Скорости поезда относительно земли
4. Как пассажир и пешеход получают времена для своего описания?
- a. Они пользуются одними часами на насыпи
 - b. Они вычисляют время по тому, как далеко упал камень
 - c. Каждый держит одни из двух одинаковых часов и отмечает, где камень на его собственном теле отсчёта при каждом тике
 - d. Каждый измеряет, сколько времени свет от камня идёт до него

Ответы

1. c) Траектории самой по себе нет, есть лишь траектория относительно определённого тела отсчёта; ни одна из них не настоящая при другой иллюзорной.

- 2. а)** «Пространство», если быть честными, слово, с которым мы не связываем никакого ясного представления; места относительно тела отсчёта — ровно то, что предыдущая часть научила нас задавать.
- 3. б)** Нужно ещё сказать, когда камень находится в каждой точке траектории, и эти времена должны быть тем, что можно измерить, а не числами, взятыми из воздуха.
- 4. в)** Двое совершенно одинаковых часов, одни в руке пассажира, другие в руке пешехода, и каждый отмечает, где камень на его собственном теле отсчёта при каждом тике его собственных часов.

Задачи

- 1.** Пассажир плавно идущего поезда роняет камень из окна. Опишите его траекторию относительно вагона и относительно земли и объясните, почему спрашивать, какая траектория настоящая, значит не спрашивать ничего.

Подсказка: Назовите тело отсчёта, прежде чем описывать траекторию.

Ответ: Относительно вагона камень падает отвесно; относительно земли он движется вперёд вместе с поездом, пока падает, и вычерчивает кривую. Траектории самой по себе нет, есть лишь траектория относительно определённого тела отсчёта, так что вопрос, в котором тело отсчёта опущено, ничего не говорит.

- 2.** Пассажир и пешеход записывают по списку мест камня при тиках своих часов. Скажите, что у списков общего и чем они различаются, и почему такой список, а не одна траектория, есть полное описание движения.

Подсказка: Спросите, что тик добавляет к точке траектории.

Ответ: Оба списка сопоставляют тики одного рода с местом камня; места пассажира лежат на вертикальной прямой, места пешехода —

на кривой, каждое чуть дальше вдоль пути. Одна траектория говорит, где камень прошёл, но не когда; список даёт время в каждой точке, и, поскольку времена идут от часов в руке наблюдателя, они измерены, что и нужно полному описанию.

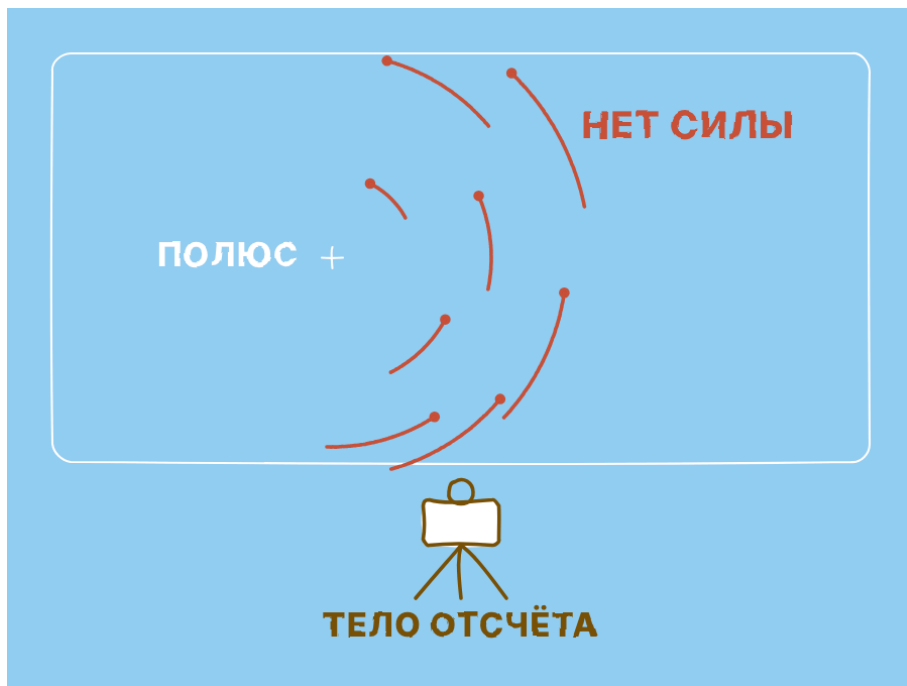
3. Что не учитывает сопоставление тика часов с местом камня, и почему Эйнштейн позволяет себе не учитывать это здесь?

Подсказка: Спросите, как пешеход узнаёт, где камень в момент тика.

Ответ: Оно не учитывает, что свету нужно время, чтобы дойти, так что пешеход видит камень там, где тот был мгновение назад, а не там, где он есть. Эйнштейн откладывает это, потому что пока стоит на почве обычной механики, и обещает разобрать это, вместе со второй трудностью, позже в книге.

Какие тела отсчёта допустимы?

Оставьте камеру направленной на ночное небо с открытым затвором на час. Звёзды выходят не точками, а дугами, кусками окружностей вокруг одной точки неба. Никто не толкает эти звёзды; они так далеки от всего, что ничто до них не доходит. И всё же относительно земли каждая из них прошла по кривой.



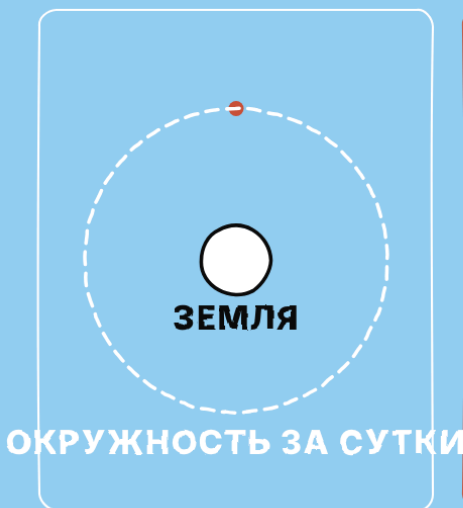
Следы звёзд над камерой

Эйнштейн начинает с закона инерции: тело, далёкое от всех других тел, остаётся в покое или продолжает двигаться по прямой с постоянной скоростью. Это звучит как правило о телах,

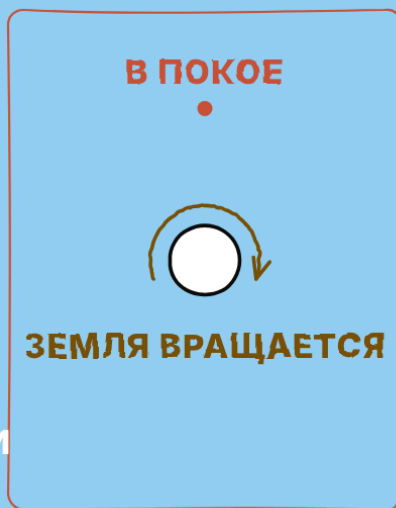
но после камня из поезда мы знаем, что это в той же мере правило о телах отсчёта, потому что «прямая» ничего не значит, пока мы не скажем, относительно чего. Неподвижные звёзды — тела, к которым закон должен подходить лучше всего, а относительно Земли они кружат раз в сутки. Значит, либо уходит закон, либо уходит Земля как тело отсчёта, и Эйнштейн сохраняет закон.

Тогда движение можно относить только к телам отсчёта, относительно которых неподвижные звёзды не кружат. Такое тело отсчёта, в котором справедлив закон инерции, он называет галилеевой системой координат, и механика Галилея и Ньютона претендует на справедливость только для них. Спутники за приёмником вашего телефона отслеживаются именно в такой системе, сохраняющей свои направления по звёздам; приёмник переводит ответ на вращающуюся Землю для вас. Так первые четыре параграфа завершаются с разобранными телами отсчёта: галилеевы допущены, остальные пока отложены, и это «пока» — то, с чего начинается остальная часть книги.

ЗЕМНАЯ СИСТЕМА



ГАЛИЛЕЕВА



ЗАКОН ИНЕРЦИИ ВЕРЕН

Земная система против галилеевой

Запомним

Закон инерции гласит, что тело, далёкое от всех других, остаётся в покое или движется равномерно по прямой, и это правило о телах отсчёта в той же мере, что и о телах.

Относительно Земли неподвижные звёзды кружат раз в сутки, так что Земля не тело отсчёта, в котором справедлив закон. Тело отсчёта, в котором справедлив закон инерции, — это галилеева система координат, и механика Галилея и Ньютона верна только для них.

Вопросы

1. Относительно системы координат, жёстко связанной с Землёй, что делает неподвижная звезда за одни астрономические сутки?
 - a. Остаётся в покое, как требует закон инерции
 - b. Описывает окружность огромного радиуса, вопреки формулировке закона инерции
 - c. Двигается равномерно по прямой
2. Почему закон инерции — утверждение о телах отсчёта в той же мере, что и о телах?
 - a. Потому что тела отсчёта сами далеки от всех других тел
 - b. Потому что покой или равномерное прямолинейное движение — таковы только относительно названного тела отсчёта
 - c. Потому что закон нашли, наблюдая неподвижные звёзды
 - d. Потому что телами отсчёта могут быть только твёрдые тела
3. Что такое галилеева система координат?
 - a. Система координат, жёстко связанная с Землёй
 - b. Система координат, состояние движения которой таково, что относительно неё справедлив закон инерции
 - c. Любая система координат из трёх стенок под прямыми углами

- d. Система координат, движущаяся вместе с неподвижными звёздами
4. Для каких систем координат законы механики Галилея и Ньютона претендуют на справедливость?
- a. Для любой системы координат
 - b. Только для систем координат, связанных с Землёй
 - c. Только для галилеевых систем координат

Ответы

1. b) Относительно системы, жёстко связанной с Землёй, каждая неподвижная звезда описывает за одни астрономические сутки окружность огромного радиуса, в противоречии с формулировкой закона инерции.
2. b) Закон говорит нечто не только о движении тел, но и о том, какие тела отсчёта или системы координат можно использовать при механическом описании, поскольку движение всегда есть движение относительно тела отсчёта.
3. b) Система координат, состояние движения которой таково, что относительно неё справедлив закон инерции, называется галилеевой системой координат; неподвижные звёзды не совершают относительно неё кругового движения.
4. c) Только для галилеевой системы координат законы механики Галилея и Ньютона претендуют на справедливость.

Задачи

1. Объясните своими словами, почему система координат, жёстко связанная с Землёй, не является галилеевой, используя неподвижные звёзды.

Подсказка: Спросите, какую траекторию описывает неподвижная звезда относительно земли за сутки и что, по закону инерции, она должна делать.

Ответ: Неподвижная звезда далека от всех других тел, поэтому по закону инерции она должна покоиться или двигаться равномерно по прямой. Относительно системы, связанной с Землёй, она вместо этого описывает раз в сутки окружность огромного радиуса. Закон относительно этой системы не выполняется, значит, система не галилеева.

2. Эйнштейн сохраняет закон инерции и отказывается от некоторых тел отсчёта. Сформулируйте правило, к которому это ведёт, и назовите род системы координат, который получается.

Подсказка: Чего не должны делать неподвижные звёзды относительно допустимой системы?

Ответ: Движения можно относить только к системам координат, относительно которых неподвижные звёзды не кружат. Система координат, в которой справедлив закон инерции, — галилеева система координат, и механика Галилея и Ньютона претендует на справедливость только для таких систем.

3. Приятель говорит, что закон инерции должен быть ложен, раз звёзды явно кружат каждую ночь. Ответьте ему с помощью идей этой части.

Подсказка: Отделите утверждение о телах от утверждения о телах отсчёта.

Ответ: Окружности — это траектории звёзд относительно вращающейся Земли, а траектория существует лишь относительно тела отсчёта. Закон претендует на справедливость только для галилеевых систем координат, в которых неподвижные звёзды не кружат; земная система не из их числа, так что ночное небо противоречит выбору тела отсчёта, а не закону.