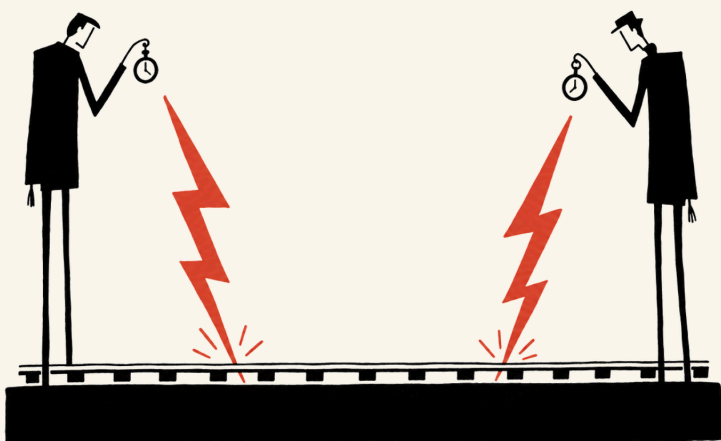


О специальной и общей теории относительности



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?

Три числа для места

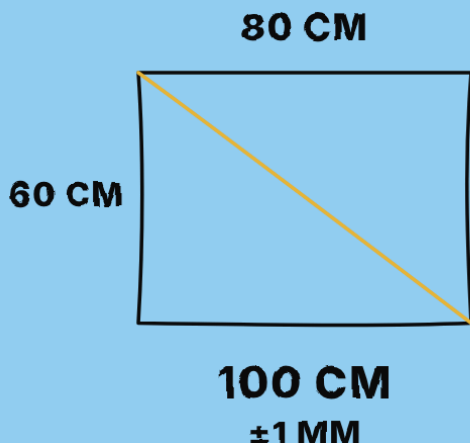
Камень, упавший двумя путями

Какие тела отсчёта допустимы?

Когда теорема истинна?

Возьмите рулетку и подойдите к прямоугольному столу, годится и кухонный. Измерьте короткую сторону и длинную и запишите два числа. Теперь протяните рулетку из одного угла в противоположный, по диагонали, но прежде чем прочесть число, предскажите его с помощью единственной теоремы, которую все помнят со школы. Допустим, стороны вышли 60 сантиметров и 80 сантиметров. Шестьдесят в квадрате — 3600, восемьдесят в квадрате — 6400, сумма — 10 000, а квадратный корень из 10 000 — 100. Вы смотрите на рулетку, и вот оно: 100 сантиметров, плюс-минус миллиметр. Что именно вы только что подтвердили?

ПРЕДСКАЖИ И ИЗМЕРЬ



$$d^2 = 60^2 + 80^2$$

$$d^2 = 10000$$

$$d = 100 \text{ cm}$$

ЧТО ИСТИННО?

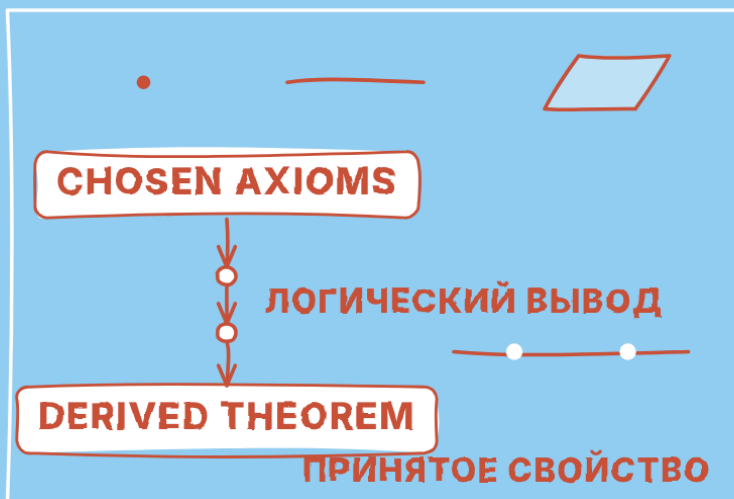
Предсказание встречается измерение

Большинство сказало бы, что проверили правоту Пифагора, что теорема истинна. Альберт Эйнштейн открывает свою небольшую книгу тем, что останавливает нас ровно здесь и спрашивает, не без лукавства, что мы вообще 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 что вспоминаем мы 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, говорит он, наша гордая уверенность может испариться, едва кто-нибудь спросит, что же должно означать слово «истинный».

Вот как построена геометрия. Она начинается с нескольких основных понятий, таких как плоскость, точка и прямая, которые мы представляем себе более или менее ясно, и с нескольких простых утверждений о них, аксиом, которые мы готовы принять, потому что картинки делают их очевидными. Всякое другое утверждение затем выводится из аксиом логическими шагами, правомерность которых мы чувствуем себя обязанными признать; этот вывод и называется доказательством. Итак, внутри геометрии теорема правильна, или «истинна», когда она правильно выведена из аксиом, и ничего больше. Весь вопрос об истинности тем самым переносится на сами аксиомы. И там он умирает, потому что, как говорит Эйнштейн, на вопрос, истинна ли аксиома, геометрия ответить не может, и хуже того, этот вопрос вовсе лишён смысла.

ЧИСТАЯ ГЕОМЕТРИЯ

?



Внутри чистой геометрии

Попробуйте на самой простой аксиоме. Истинно ли, что через две точки проходит только одна прямая? Этого спросить нельзя. Можно лишь сказать, что евклидова геометрия имеет дело с некоторыми объектами, которые она называет прямыми, и что она наделяет их свойством определяться двумя своими точками. Слово «истинный» не подходит к утверждениям чистой геометрии, потому что, говоря «истинный», мы в конечном счёте всегда имеем в виду согласие с какой-то реальной вещью, а чистая геометрия не о реальных вещах. Она лишь о логических связях между её собственными понятиями.

Отчего же тогда так естественно называть теоремы истинными? Оттого, что понятия геометрии более или менее точно

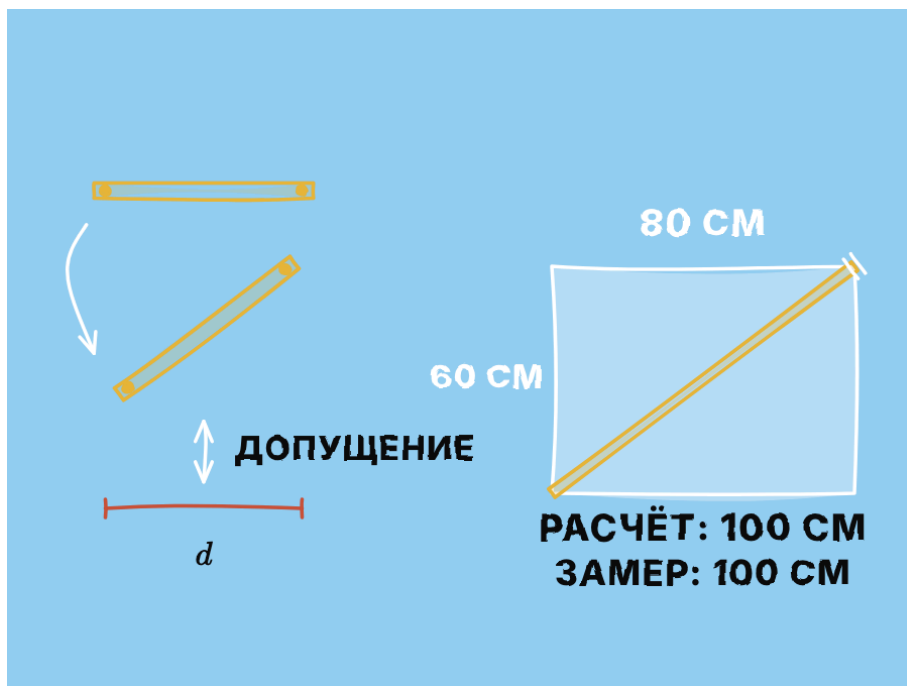
соответствуют предметам природы, и эти предметы, без сомнения, и есть причина, по которой понятия вообще возникли. Геометрия может держаться от природы на расстоянии, чтобы сделать своё здание логически непроницаемым, но привычка видеть в отрезке две метки на практически твёрдом теле сидит в нашем мышлении глубоко. Мы также по привычке считаем три места лежащими на одной прямой, когда, глядя одним глазом с подходящего места, можем заставить их видимые положения совпасть. Это физическая проверка, сделанная глазом и телом, а не логическая.

Опыт

Поставьте три карандаша вертикально в комочки пластилина на столе примерно в ряд и посмотрите на них, закрыв один глаз. Медленно двигайте головой из стороны в сторону. Если они действительно в линию, найдётся одна точка зрения, с которой ближний карандаш закрывает два других, и три фигуры сливаются в один узкий силуэт. Вы только что использовали свой глаз как прибор для проверки прямизны; запомните эту картину, потому что на ней держится весь параграф.

Теперь Эйнштейн делает решающий ход, и это одна добавленная фраза. К теоремам Евклида мы добавляем ещё одно утверждение: двум точкам практически твёрдого тела всегда соответствует одно и то же расстояние, один и тот же отрезок, какие бы изменения положения мы ни производили с телом. Ничего такого в чистой геометрии нет; это утверждение о стальных линейках, деревянных стержнях и поведении

реального вещества. Как только оно добавлено, теоремы евклидовой геометрии превращаются в утверждения о возможном взаимном расположении практически твёрдых тел. Дополненную так геометрию следует рассматривать как раздел физики.



Добавленное физическое допущение

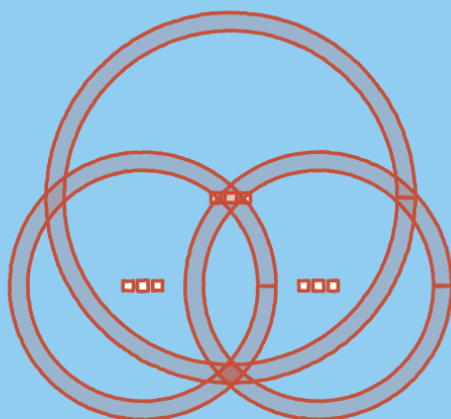
И теперь вопросу об истинности снова разрешено войти, потому что теперь ему есть за что зацепиться. Мы можем спрашивать, верны ли эти теоремы для реальных вещей, которые мы сопоставили геометрическим понятиям: меток, кромок, стержней. Несколько неточно, говорит Эйнштейн, мы можем понимать под «истинностью» геометрической теоремы в этом смысле её подтверждение при построении циркулем и линейкой.

Именно это вы и сделали за кухонным столом. Теорема о диагонали была истинна в физическом смысле, потому что рулетка, практически твёрдое тело, согласилась с предсказанием.

Тот же ход делается, в большом масштабе, всякий раз, когда ваш телефон определяет своё положение. Приёмник спутниковой навигации измеряет расстояния до нескольких спутников, а затем применяет обычную геометрию, ту же геометрию отрезков и точек, чтобы превратить эти расстояния в место на карте.

Никто не мог заранее доказать, что это сработает; это работает потому, что применённая геометрия согласуется с опытом, с тем, где телефон на самом деле оказывается. Геометрия зарабатывает свою физическую истинность так же, как любое физическое утверждение: проверкой на мире.

СХЕМА НА ПЛОСКОСТИ



ПРИНЯТО

ПОГРЕШНОСТИ

СОГЛАСИЕ

Расстояния находят приёмник

Эйнштейн тщательно добавляет, что убеждение в истинности геометрических теорем в этом смысле покоится не более чем на довольно несовершенном опыте. Рулетка никогда не бывает совершенно твёрдой, глаз никогда не бывает совершенно прямым. Пока, говорит он, мы примем эту истинность, потому что без неё мы ничего не сможем описать, а в последней части книги, когда дойдём до общей теории относительности, увидим, что у неё есть границы, и где они проходят. Это обещание — нить, за которую стоит держаться: геометрия, которой вы доверились за столом, принимается условно.

Запомним

Теорема чистой геометрии «истинна» лишь в том смысле, что следует из аксиом, а вопрос об истинности аксиом внутри геометрии лишён смысла. Теоремы кажутся истинными, потому что их понятия выросли из реальных предметов, и мы привыкли видеть в отрезке две метки на твёрдом теле. Добавьте одно физическое утверждение, что две точки практически твёрдого тела сохраняют расстояние между собой, как бы тело ни перемещали, и геометрия станет разделом физики о расположении таких тел. Тогда теорема истинна в физическом смысле, когда с ней согласны построение циркулем и линейкой, 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 чистой геометрии, что значит сказать, что теорема истинна?
 - а. Она согласуется с измерениями на реальных предметах
 - б. Она правильно выведена из аксиом, и ничего больше
 - с. Большинство людей, внимательно подумав, находят её очевидной

2. Почему Эйнштейн говорит, что вопрос, истинна ли аксиома, внутри геометрии лишён смысла?
- a. Потому что аксиомы слишком просты, чтобы в них сомневаться
 - b. Потому что аксиому можно доказать только из других аксиом
 - c. Потому что чистая геометрия имеет дело лишь с логическими связями между своими понятиями, а не с реальными вещами
 - d. Потому что никто ещё не нашёл способа их проверить
3. Какое единственное добавление превращает геометрию Евклида в раздел физики?
- a. Утверждение, что две точки практически твёрдого тела сохраняют расстояние между собой, как бы тело ни перемещали
 - b. Утверждение, что аксиомы истинны, потому что опыт их подтверждает
 - c. Утверждение, что прямая — кратчайший путь между двумя точками
 - d. Утверждение, что свет всегда движется по прямым
4. После этого добавления, когда геометрическая теорема истинна в физическом смысле?
- a. Когда её можно вывести из аксиом принятым способом
 - b. Когда она подтверждается при построении из реальных тел, например циркулем и линейкой
 - c. Когда добросовестные учителя давно её принимают

Ответы

1. **b)** Внутри геометрии теорема правильна, или истинна, лишь когда она выведена из аксиом принятыми логическими шагами; согласие с реальными вещами — не то, о чём чистая геометрия.
2. **с)** Слово «истинный» в конечном счёте всегда означает согласие с какой-то реальной вещью, а чистая геометрия не о реальных вещах; она лишь о том, как её понятия логически связаны.
3. **a)** Как только мы добавляем, что двум точкам практически твёрдого тела всегда соответствует один и тот же отрезок, что бы мы ни делали с телом, теоремы становятся утверждениями о возможном расположении таких тел, а это физика.
4. **b)** Эйнштейн говорит, несколько неточно, что истинность геометрической теоремы в этом смысле означает её подтверждение при построении циркулем и линейкой, то есть проверку на реальных вещах.

Задачи

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

Подсказка: Отделите теорему как утверждение, выведенное из аксиом, от теоремы как утверждения о рулетке и столешнице.

Ответ: Приятель прав в физическом смысле: с добавленным утверждением, что рулетка — практически твёрдое тело, метки которого сохраняют расстояние, теорема становится утверждением о реальных отрезках, и стол с ней согласился. В смысле чистой геометрии он не проверил ничего, потому что там теорема истинна лишь тем, что выведена из аксиом, и никакое измерение к этому не относится.

2. Почему, по Эйнштейну, нельзя даже задать вопрос, проходит ли через две точки только одна прямая, тогда как вопрос, совпадает ли измеренная диагональ с вычисленной, задать можно?

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

Ответ: Первое — утверждение чистой геометрии об объектах, которые она решает называть прямыми и которые определены этим свойством; спросить, истинно ли оно, значило бы спросить о согласии с реальной вещью, а чистая геометрия не о реальных вещах. Второе — о метках на твёрдой рулетке и столешнице, реальных вещах, сопоставленных понятиям, так что согласие или несогласие с ними — осмысленный вопрос.

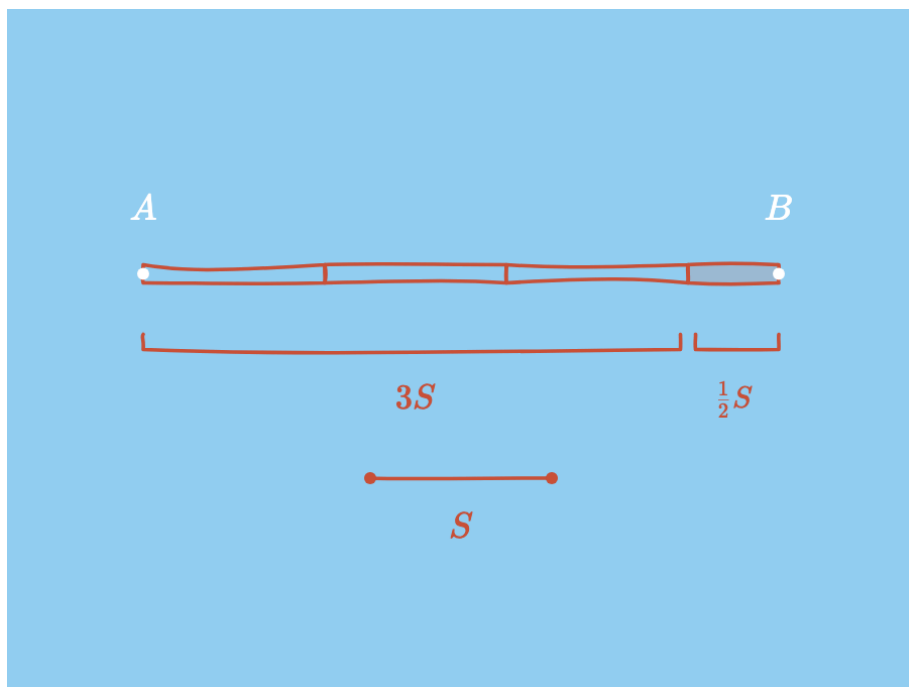
3. Эйнштейн говорит, что наша убеждённость в том, что геометрия верна для реальных тел, покоится на довольно несовершенном опыте, и что мы пока принимаем её. Назовите две причины несовершенства этого опыта на примерах этой части и скажите, что Эйнштейн обещает по этому поводу.

Подсказка: Подумайте, что такое на самом деле рулетка и прицеливающийся глаз.

Ответ: Рулетка никогда не бывает совершенно твёрдой, поэтому две метки на ней не сохраняют в точности одно расстояние; а глаз, выстраивающий три карандаша в линию, даёт грубую проверку прямизны, а не точную. Поэтому согласие геометрии с реальными телами лишь приблизительно. Эйнштейн обещает пока принять это согласие и в последней части книги, об общей теории относительности, показать, что у него есть границы, и где они.

Три числа для места

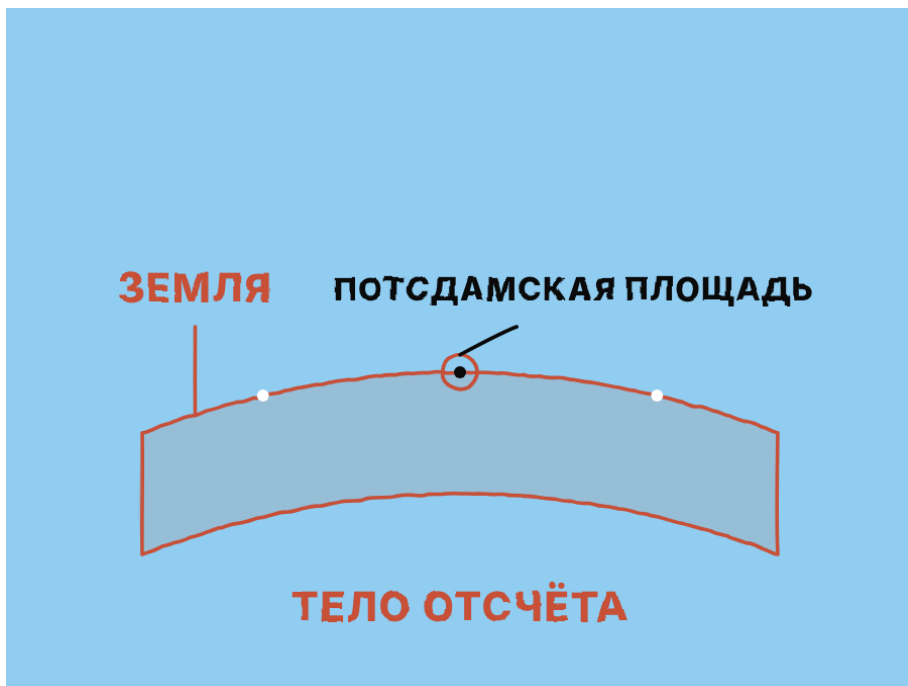
Возьмите короткую деревянную линейку и измерьте ею ширину дверного проёма. Вы прикладываете линейку к косяку, отмечаете пальцем, где она кончается, прикладываете снова от отметки и считаете: одна, две, три длины линейки и немного сверх того. Эйнштейн просит нас присмотреться к этому повседневному действию, потому что на нём держится всякое утверждение о том, где что находится, и в физике, и в быту.



Длина — это повторённая единица

В прошлый раз мы договорились, что две метки на практически твёрдом теле — это и есть отрезок. Теперь возьмите один такой отрезок и условьтесь пользоваться им раз и навсегда: небольшой стержень, назовём его S , единица меры. Если A и B — две точки твёрдого тела, то соединяющую их прямую можно построить по правилам геометрии, и вдоль этой прямой вы укладываете стержень S от A столько раз, сколько нужно, чтобы дойти до B . Число раз, которое вам пришлось его уложить, и есть мера отрезка AB . Всякое измерение длин, каждая рулетка и каждый лазерный дальномер, сводится к этому счёту повторяемой единицы.

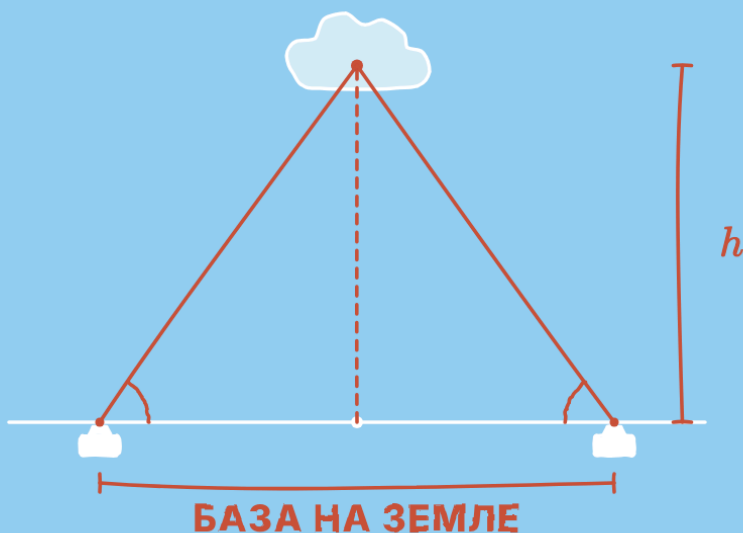
Теперь к вопросу о том, где находится вещь. Всякое пространственное описание места события или предмета, говорит Эйнштейн, состоит в том, чтобы назвать точку твёрдого тела, с которой событие совпадает. Это твёрдое тело — тело отсчёта. Так не только в науке; так устроена повседневная речь. Скажите: «в Берлине, на Потсдамской площади». Поверхность Земли — твёрдое тело, к которому относится это утверждение; на ней «Потсдамская площадь в Берлине» — отмеченная точка с названием, и событие находится в этой точке.



Место на теле отсчёта

Но этот способ указывать место первобытен в двух отношениях. Он знает только места на поверхности твёрдых тел и зависит от того, есть ли на этой поверхности различимые точки с названиями. Эйнштейн показывает, как человеческий ум освобождается от обоих ограничений, не меняя того, что такое указание места. Пусть над Потсдамской площадью плывёт облако. Его место относительно поверхности Земли можно задать, поставив на площади вертикальный шест, достаточно высокий, чтобы достать до облака. Длина шеста, измеренная единичным стержнем, вместе с местом основания шеста есть полное указание, где находится облако.

ИЗМЕРЕННЫЕ ЧИСЛА

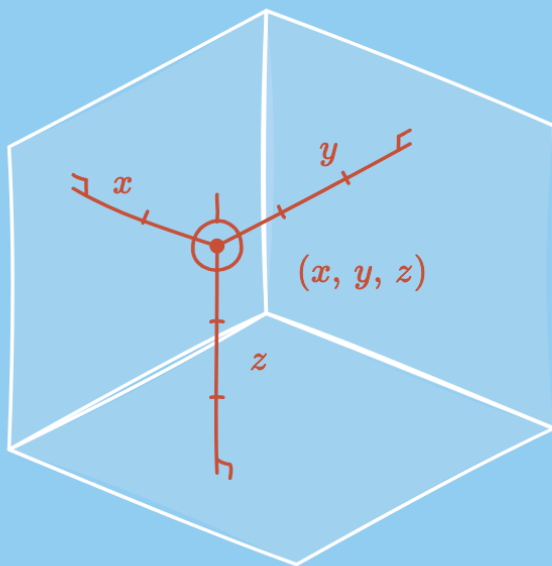


Измерение нестроенного шеста

Присмотритесь к тому, что произошло в этом примере, потому что в нём скрыты три уточнения понятия места. Во-первых, твёрдое тело отсчёта продолжено шестом так, чтобы достичь предмета, который нужно локализовать. Во-вторых, число, измеренная длина шеста, заменило именованную примету в характеристике места. В-третьих, мы говорим о высоте облака, даже когда шест, достигающий его, вовсе не построен. В этом случае облако фотографируют с нескольких точек на земле и, зная, как распространяется свет, вычисляют, какой длины должен был бы быть шест. Шест воображаемый, но его длина всё равно измерена.

Отсюда Эйнштейн выводит урок: при описании мест выгодно освободиться, с помощью измеренных чисел, от необходимости в именованных приметах на теле отсчёта. Измеряющая физика делает это с помощью декартовой системы координат. Представьте себе три жёсткие плоские стенки, каждая перпендикулярна двум другим, соединённые в одно твёрдое тело, как две стены и пол, сходящиеся в углу комнаты. Место любого события относительно этой системы описывается, в сущности, длинами трёх перпендикуляров, которые можно опустить из события на три стенки. Эти три длины и есть координаты, записываемые (x, y, z) . Каждую из них можно найти последовательностью манипуляций с жёсткими стержнями, выполняемых по законам и методам евклидовой геометрии.

ТРИ ИЗМЕРЕННЫХ РАССТОЯНИЯ



Три расстояния задают место

Попробуйте в своей комнате. Выберите угол, где две стены сходятся с полом. Лампа, висящая в комнате, находится на таком-то расстоянии от одной стены, на таком-то от другой и на такой-то высоте над полом: три расстояния, три уложенных и сосчитанных стержня, и место лампы задано без всякой приметы. Передвиньте лампу, и изменятся только три числа; стены останутся какими были.

На практике, признаёт Эйнштейн, три жёсткие стенки почти никогда не строят, а координаты почти никогда не находят построениями с жёсткими стержнями; их находят косвенно. Спутниковый приёмник у вас в кармане никогда не прикладывает стержень ни к чему; он измеряет, сколько времени шли сигналы от нескольких спутников, и вычисляет по этим временам свои три координаты, как высоту облака вычислили по снимкам. И всё же физический смысл каждого такого указания места должен всегда отыскиваться так, как мы только что описали, в стержнях, приложенных к твёрдому телу. Иначе, предупреждает он, результаты физики и астрономии расплывутся в неясность.

Вот к чему приходит этот параграф. Всякое пространственное описание событий пользуется твёрдым телом, к которому события относятся. Это отнесение предполагает, что для отрезков справедливы законы евклидовой геометрии, где отрезок физически представлен двумя метками на твёрдом теле. Допущение, которое мы в прошлый раз приняли условно, теперь несёт на себе всю идею места.

Запомним

Длина измеряется укладыванием выбранного единичного стержня вдоль прямой между двумя точками и счётом повторений; всякое измерение длины сводится к этому. Сказать, где что-то находится, значит назвать точку твёрдого тела отсчёта, с которой оно совпадает, как «Потсдамская площадь в Берлине» называет точку на поверхности Земли. Понятие места уточняется продолжением тела отсчёта, заменой именованных примет измеренными числами и разговором о длине даже тогда, когда стержень лишь воображаем. Декартова система координат делает это систематическим: три взаимно перпендикулярные жёсткие стенки, и три перпендикулярных расстояния от события до них — его координаты. Найдено ли место стержнями или вычислено по сигналам, указание места означает именно это и предполагает, что евклидова геометрия верна для отрезков на твёрдых телах.

Вопросы

1. Из чего, по лекции, на самом деле состоит мера отрезка АВ?
 - а. Из числа раз, которое единичный стержень S нужно уложить вдоль прямой от A до B
 - б. Из расстояния, которое сигналу нужно пройти от A до B
 - с. Из числа именованных меток, лежащих между A и B на твёрдом теле

2. Что означает утверждение вроде «в Берлине, на Потсдамской площади», если разобрать его так, как лекция?
- a. Что событие лежит на определённом расстоянии от центра Земли
 - b. Что у события три координаты, измеренные от стен комнаты
 - c. Что событие совпадает с отмеченной именованной точкой твёрдого тела, поверхности Земли
 - d. Что до события можно дотянуться шестом, поставленным на площади
3. Над площадью плывёт облако. Какое уточнение понятия места работает, когда его высоту вычисляют по снимкам, сделанным с нескольких точек на земле?
- a. Тело отсчёта продолжено настоящим шестом до облака
 - b. Число встало на место именованной приметы на поверхности Земли
 - c. О длине говорят, хотя стержень, который её измерил бы, так и не построен
 - d. Облако рассматривают как точку твёрдого тела отсчёта
4. Почему Эйнштейн настаивает, что физический смысл указания места всегда должен отыскиваться в стержнях, приложенных к твёрдому телу, даже когда координаты находят косвенно?
- a. Потому что косвенные методы вроде сигналов никогда не бывают достаточно точны

- б. Потому что иначе результаты физики и астрономии теряют определённый смысл
- с. Потому что три жёсткие стенки системы координат на практике всегда построены

Ответы

- 1. а) Вдоль прямой, соединяющей А и В, вы укладываете стержень S от А столько раз, сколько нужно, чтобы дойти до В; число повторений есть мера отрезка, и всякое измерение длин сводится к этому.
- 2. с) Всякое пространственное описание называет точку твёрдого тела отсчёта, с которой событие совпадает; здесь поверхность Земли — тело отсчёта, а Потсдамская площадь — именованная точка на ней.
- 3. с) Мы говорим о высоте облака, даже когда шеста, достигающего его, нет; по снимкам и зная, как распространяется свет, вычисляют, какой длины он должен был бы быть, так что шест воображаемый, но длина измерена.
- 4. б) Стенки почти никогда не строят, и координаты находят косвенно, но их смысл должен быть тем, что задают стержни и твёрдое тело, 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 измеряется каждая.

Подсказка: Представьте три плоские стенки как твёрдое тело и спросите, что такое перпендикуляр, опущенный из лампы на каждую стенку.

Ответ: Две стены и пол — три взаимно перпендикулярные жёсткие плоскости, соединённые в одно твёрдое тело. Опустите из лампы

перпендикуляр на каждую из них; длины этих трёх перпендикуляров и есть координаты x , y , z . Каждая длина находится, в принципе, укладыванием единичного стержня вдоль перпендикуляра и счётом повторений, построением по евклидовой геометрии.

2. Эйнштейн говорит, что первобытный способ указывать место связан двумя ограничениями. Назовите их и скажите для каждого, как пример с облаком освобождает нас от него, не меняя того, что такое указание места.

Подсказка: Начните с того, что может и чего не может указать «Потсдамская площадь в Берлине».

Ответ: Первобытный способ знает только места на поверхности твёрдого тела, и ему нужны различимые, именованные точки на этой поверхности. Шест продолжает твёрдое тело вверх, так что можно задать место вне поверхности; а измеренная длина шеста, число, заменяет именованную примету. В обоих случаях указание по-прежнему называет точку твёрдого тела, с которой облако совпадает, так что его природа не изменилась.

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 описывает лекция, и на каком допущении о геометрии он покоится?

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

Ответ: Приёмник находит свои координаты косвенно, как высоту облака нашли по снимкам, но их физический смысл по-прежнему — длины трёх перпендикуляров к твёрдому телу отсчёта, длины, которые в принципе мог бы измерить стержень. Как и всякое пространственное описание, он предполагает, что евклидова

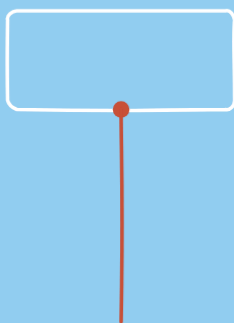
геометрия верна для отрезков, где отрезок — две метки на твёрдом теле.

Камень, упавший двумя путями

Сядьте у окна поезда, который плавно идёт по прямому пути с постоянной скоростью, без толчков. Высуньте камень в окно и просто отпустите его, не придавая никакого толчка. Смотрите. Вы видите, если не считать воздуха, как камень падает отвесно, словно поезд стоит; он покидает вашу руку и падает вертикально на насыпь внизу. Теперь поставьте себя на место пешехода на тропинке у путей, который видит, как тот же камень покидает ту же руку. Пешеход видит, что камень падает по кривой, параболе, увлекаемый вперёд вместе с поездом, пока падает, и ложится далеко впереди того места, где был отпущен. Два честных свидетеля, один камень и две разные траектории.

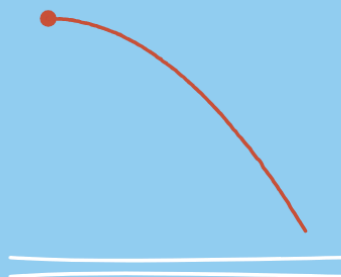
ОДИН ПАССАЖИР, ДВЕ СКОРОСТИ

ВАГОН



0 КМ/Ч

ЗЕМЛЯ



100 КМ/Ч

Один камень, две траектории

Эйнштейн открывает этот параграф признанием. Если он скажет, не задумываясь, что механика должна описывать, как тела со временем меняют своё место в пространстве, он совершит, по его собственным словам, несколько смертных грехов против святого духа ясности. Грехи прячутся в двух коротких словах, «место» и «пространство», и падающий камень — его способ вывести их на свет. Задайте вопрос, который, кажется, требует ответа: лежат ли места, которые проходит камень, «на самом деле» на прямой или на параболе? И что вообще значит сказать, что камень движется «в пространстве»?

Ответ, говорит Эйнштейн, очевиден после того, что мы сделали в прошлый раз, и вот почему. Слово «пространство», если быть

честными, тёмное слово, с которым мы не можем связать ровно никакого определённого представления, так что мы его целиком отставляем. Вместо него мы ставим «движение относительно практически твёрдого тела отсчёта». А места относительно тела отсчёта — ровно то, что определил предыдущий параграф: совпадением с точкой тела или тремя измеренными перпендикулярами. Для камня предлагаются два тела отсчёта: железнодорожный вагон и земля. Относительно вагона камень проходит последовательность мест, лежащих одно под другим, на прямой. Относительно земли он проходит места, лежащие на параболе.

Поскольку система координат, три жёсткие стенки, есть математически удобная форма тела отсчёта, Эйнштейн говорит так: камень описывает прямую относительно системы координат, жёстко связанной с вагоном, и параболу относительно системы координат, жёстко связанной с землёй. Ни одно описание не настоящее при другом иллюзорном. Скажем это дважды, потому что из этого зерна вырастает вся теория относительности: траектории самой по себе не существует. Есть лишь траектория относительно определённого тела отсчёта. Уберите тело отсчёта из фразы, и фраза ничего не скажет.

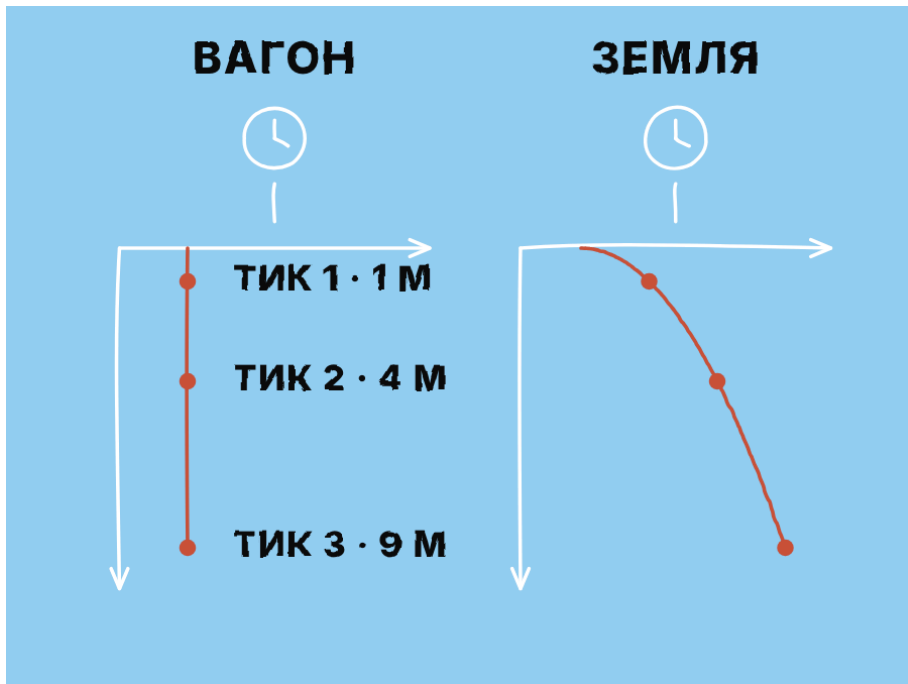
Опыт

В следующий раз, когда вы поедете пассажиром 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 себя стоящим на тротуаре и смотрящим на монету через окно: она 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 этому правилу. Он сообщает ваше движение относительно поверхности Земли, тела отсчёта, которое вас интересует, и пассажир, глядящий на него в поезде, видит скорость сто километров в час, сидя совершенно неподвижно относительно вагона. Ни одно из чисел не ошибочно; каждое принадлежит своему телу отсчёта, и приёмник молча выбрал одно из них.

Но траектория, даже с названным телом отсчёта, ещё не есть описание движения. Полное описание должно сказать, как тело меняет своё место со временем; для каждой точки траектории мы должны указать, в какое время тело там находится. И эти времена, настаивает Эйнштейн, должны быть определены так, чтобы считаться принципиально наблюдаемыми величинами, результатами измерений, а не числами, взятыми из воздуха. Стоя на почве классической механики, он выполняет это требование так. Представьте себе двое часов, устроенных совершенно одинаково; одни держит человек у окна вагона, другие — пешеход на тропинке. Каждый из них отмечает, в какой точке

своего тела отсчёта находится камень в момент, когда тикают его собственные часы. Тик, камень здесь; тик, он там; и список мест в паре с тиками есть полное описание движения относительно этого тела отсчёта и этих часов.

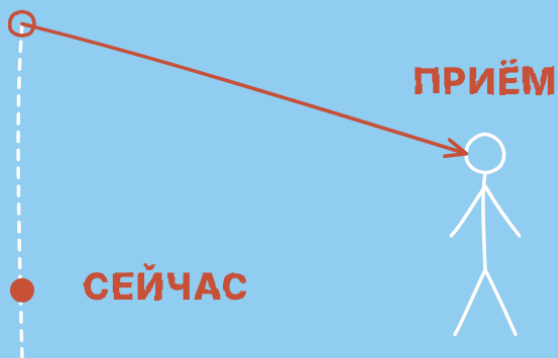


Места в паре с тиками

Представьте два списка рядом. Список пассажира гласит: тик один, метр ниже руки; тик два, четыре метра ниже; тик три, девять метров ниже, всегда на одной вертикали. В списке пешехода те же высоты, но каждое место ещё и чуть дальше вдоль пути, чем предыдущее, так что, соединённые, они дают параболу. Тот же камень, те же тики, два тела отсчёта, два списка.

Эйнштейн заканчивает параграф двумя тихими предостережениями и откладывает их на потом. Сопоставляя тик с местом, мы пренебрегли неточностью, которая закрадывается оттого, что свет движется с конечной скоростью: пешеход видит камень там, где тот был мгновение назад, а не там, где он есть. Здесь таится и вторая трудность, и он обещает подробно разобрать обе. Они не малы: спутниковые часы, питающие ваш приёмник, движутся со скоростью тысяч метров в секунду высоко над землёй и уходили бы на километры в день, если бы этими трудностями пренебрегли, и остальная часть книги — рассказ о том, как принять их всерьёз. Так что эти первые три параграфа останавливаются там, где останавливается собственное рассуждение Эйнштейна: геометрия, ставшая физической благодаря твёрдым телам, места, заданные стержнями относительно тела отсчёта, и движение, существующее лишь относительно тела отсчёта и часов. Всё, что следует в книге, стоит на этих трёх этажах.

УВИДЕТЬ — ЭТО НЕ МГНОВЕННО ВСПЫШКА



Увидеть — это не мгновенно

Запомним

«Движение в пространстве» ничего не значит, пока мы не заменим тёмное слово «пространство» практически твёрдым телом отсчёта или его математической формой, системой координат. Камень, уроненный из поезда, падает по прямой относительно вагона и по параболе 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 траектории, и времена должны быть наблюдаемыми величинами: здесь тики часов в руке наблюдателя в паре с местами камня на его собственном теле отсчёта. Две трудности отложены, конечность скорости света и вторая, ещё не названная, и остальная часть книги берётся за них.

Вопросы

1. Камень, уроненный из окна поезда, падает отвесно для пассажира и по параболе для пешехода. Какая траектория настоящая?
 - а. Парабола, потому что земля покоится, а поезд движется
 - б. Прямая, потому что камень отпущен без толчка
 - с. Ни та, ни другая: траектория существует лишь относительно выбранного тела отсчёта

2. Почему Эйнштейн отставляет слово «пространство» и говорит вместо этого о движении относительно практически твёрдого тела отсчёта?
- a. Потому что с «пространством» мы не можем связать никакого определённого представления, а места относительно твёрдого тела уже определены
 - b. Потому что пространство искривлено и его нельзя измерить жёсткими стержнями
 - c. Потому что твёрдые тела легче нарисовать, чем пустое пространство
 - d. Потому что поезд и земля движутся в пространстве с разными скоростями
3. Траектория с названным телом отсчёта — ещё не полное описание движения камня. Чего не хватает?
- a. Массы камня и силы тяжести
 - b. Времени, в которое камень находится в каждой точке траектории, заданного как измеримая величина
 - c. Скорости поезда относительно земли
4. Как в классической механике пассажир и пешеход получают времена для своего описания падающего камня?
- a. Они договариваются об одних главных часах, поставленных на насыпи
 - b. Они вычисляют время по высоте, которую пролетел 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; камень описывает прямую относительно системы координат, связанной с вагоном, и параболу относительно связанной с землёй, и ни одно описание не иллюзия.

2. a) Слово «пространство» — тёмное слово, с которым, если быть честными, мы не можем связать никакого определённого представления; места же относительно тела отсчёта — ровно то, что определил предыдущий параграф.

3. b) Полное описание должно сказать, как тело меняет своё место со временем, так что для каждой точки траектории нужно указать, когда тело там, и эти времена должны быть наблюдаемыми величинами, результатами измерений.

4. c) Двое совершенно одинаковых часов, одни у окна вагона, другие на тропинке; каждый наблюдатель отмечает, в какой точке своего тела отсчёта находится камень в момент, когда тикают его собственные часы.

Задачи

1. Пассажир плавно идущего поезда роняет камень из окна. Опишите своими словами траекторию камня относительно вагона и относительно земли и объясните, почему у вопроса «какая траектория настоящая?» нет ответа.

Подсказка: Начните с того, чтобы назвать тело отсчёта, прежде чем описывать траекторию.

Ответ: Относительно системы координат, жёстко связанной с вагоном, камень падает по вертикальной прямой; относительно

связанной с землёй он движется вперёд вместе с поездом, пока падает, и вычерчивает параболу. Траектории самой по себе нет, есть лишь траектория относительно определённого тела отсчёта, так что спрашивать, какая траектория настоящая, значит задавать вопрос без тела отсчёта, а такой вопрос ни о чём не говорит.

2. Пусть пассажир и пешеход записывают список мест камня при тиках своих часов. Скажите, что общего у двух списков и чем они различаются, и объясните, почему такой список, а не одна траектория, считается полным описанием движения.

Подсказка: Подумайте, что каждый тик добавляет к точке траектории.

Ответ: Оба списка сопоставляют одни и те же тики с местом камня; места пассажира лежат одно под другим на вертикальной прямой, места пешехода — на параболе, 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 наблюдаемые величины, чего и требует полное описание.

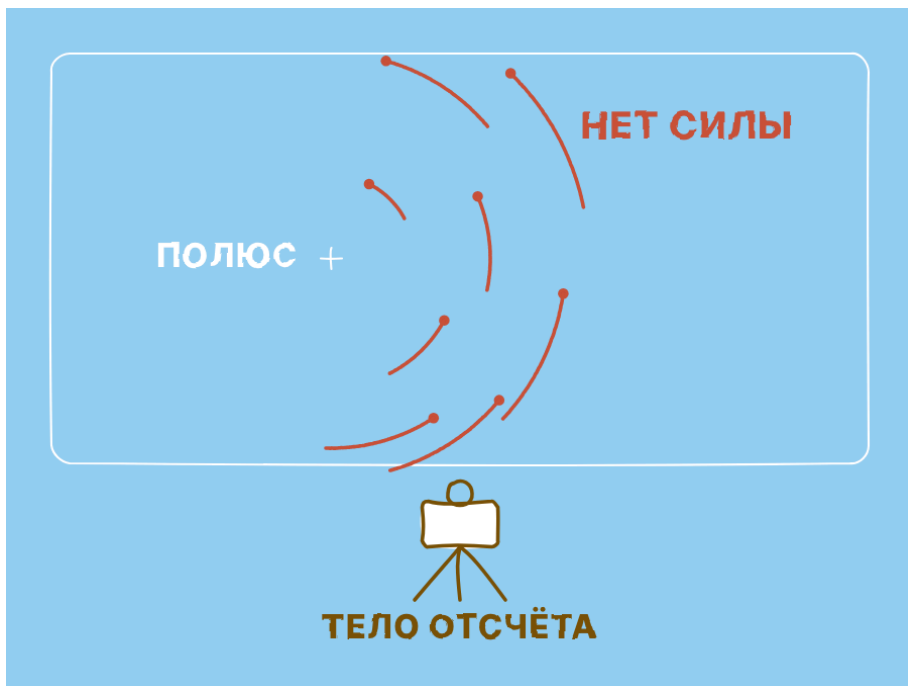
3. Эйнштейн признаёт, что сопоставление тика часов с местом камня пренебрегает одной неточностью. В чём она, и почему он позволяет себе пренебречь ею здесь?

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

Ответ: Пешеход видит камень благодаря свету, которому нужно конечное время, чтобы дойти, так что при тике камень виден там, где он был мгновение назад, а не там, где он есть. Эйнштейн откладывает это, потому что пока стоит на почве классической механики, и обещает подробно разобрать это, вместе со второй трудностью, позже в книге.

Какие тела отсчёта допустимы?

Поставьте камеру на штатив ясной ночью, направьте её в небо и оставьте затвор открытым на час. Когда вы посмотрите на снимок, звёзды окажутся не точками, а дугами, и все они — куски окружностей, проведённых вокруг одной точки неба. Никто не толкал эти звёзды; они так далеки от всего, что никакое притяжение, о котором стоило бы говорить, до них не доходит. И всё же относительно камеры, штатива и земли, на которой они стоят, каждая из них прошла по кривой. Запомните этот снимок, потому что Эйнштейн использует именно этот факт, чтобы решить, какими телами отсчёта физика вообще может пользоваться.

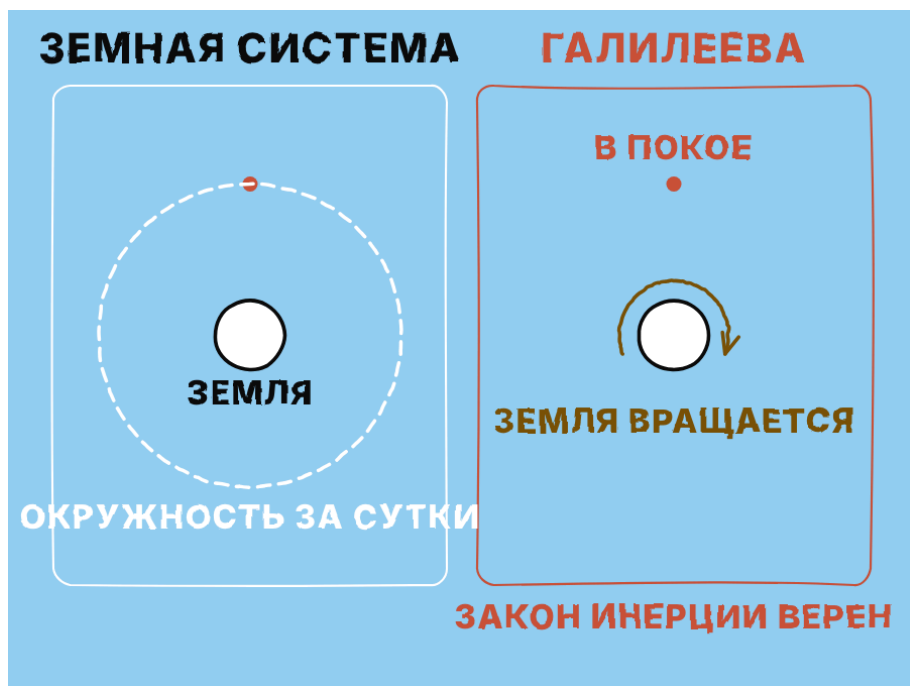


Следы звёзд над камерой

Он начинает с закона инерции, первого закона механики Галилея и Ньютона: тело, достаточно удалённое от всех других тел, остаётся в покое или продолжает двигаться равномерно по прямой. Сказанный так, он звучит как утверждение только о телах. Эйнштейн указывает, что это в той же мере утверждение о телах отсчёта, о системах координат, которыми механике разрешено пользоваться при описании движения. После камня из поезда мы знаем почему: траектория всегда лишь траектория относительно тела отсчёта, так что «движется по прямой» пусто, пока тело не названо.

Теперь сложим одно с другим. Видимые неподвижные звёзды — тела, к которым закон инерции должен применяться с большой

точностью; они удалены от всего настолько, насколько только может быть удалено видимое тело. Возьмите систему координат, жёстко связанную с Землёй, три стенки из предыдущей части, закреплённые на земле. Относительно этой системы каждая неподвижная звезда описывает за одни астрономические сутки окружность огромного радиуса. Это и есть ваш снимок, и он противоречит формулировке закона инерции, обещавшей прямую линию или покой.



Земная система против галилеевой

Значит, чем-то одним из двух придётся поступиться. Если мы держимся закона, говорит Эйнштейн, то движения можно относить только к таким системам координат, относительно которых неподвижные звёзды не движутся по окружностям.

Систему координат, состояние движения которой таково, что относительно неё справедлив закон инерции, он называет галилеевой системой координат. Только для галилеевой системы координат законы механики Галилея и Ньютона претендуют на справедливость. Земля, оборачивающаяся раз в сутки, не вполне такая система; система, сохраняющая свои направления по далёким звёздам, — такая.

Это не историческая курьёзность. Спутники, питающие приёмник вашего телефона, отслеживаются и предсказываются именно в такой системе, оси которой направлены на неподвижные звёзды и не поворачиваются вместе с Землёй, потому что только там уравнения движения принимают свой простой вид. Затем приёмник переводит результат в место на вращающейся Земле для вас. Первый выбор, который делает каждый инженер навигации, — это выбор Эйнштейна в этом параграфе: сначала выбрать галилееву систему координат, а потом описывать движение.

Здесь первые четыре параграфа книги приходят к остановке. Геометрия стала физикой благодаря твёрдым телам; места стали тремя числами на теле отсчёта; движение стало траекторией относительно такого тела и часов; а теперь разобраны и сами тела отсчёта: галилеевы допущены, остальные пока отложены. Это «пока» — петля, на которой поворачивается остальная часть книги.

Запомним

Закон инерции гласит, что тело, далёкое от всех других, остаётся в покое или движется равномерно по прямой, и это утверждение о телах отсчёта в той же мере, что и о телах. Относительно системы координат, закреплённой на Земле, неподвижные звёзды описывают огромные окружности раз в сутки, что противоречит закону в его формулировке; снимок с длинной выдержкой это показывает. Чтобы сохранить закон, движения относят только к таким системам координат, в которых неподвижные звёзды не кружат: к галилеевым системам координат, определённым как те, в которых справедлив закон инерции. Законы механики Галилея и Ньютона претендуют на справедливость только для галилеевых систем координат, и спутниковая навигация вычисляет орбиты в такой системе, прежде чем переводить их на вращающуюся Землю.

Вопросы

1. Камера, оставленная открытой на час, показывает звёзды дугами окружностей. Что из этого выводит лекция?
 - a. Что звёзды толкает по кривым какая-то сила
 - b. Что относительно системы координат, закреплённой на Земле, неподвижные звёзды движутся по окружностям, вопреки формулировке закона инерции
 - c. Что закон инерции не выполняется для звёзд

2. Почему Эйнштейн говорит, что 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 прямая или покой — это прямая или покой только относительно названного тела отсчёта
 - c. Потому что закон впервые нашли, наблюдая неподвижные звёзды
 - d. Потому что телами отсчёта могут служить 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 взаимно перпендикулярных стенок
 - d. Система координат, движущаяся вместе с неподвижными звёздами с их скоростью
4. Почему спутники за навигационным приёмником отслеживаются в системе, оси которой направлены на неподвижные звёзды?
- a. Потому что приёмник не может работать с земными координатами
 - b. Потому что только в галилеевой системе координат законы механики принимают свой простой вид
 - c. Потому что звёзды нужны, чтобы измерять расстояния до спутников

Ответы

1. **б)** Неподвижные звёзды — тела, к которым закон инерции должен применяться с большой точностью, и всё же относительно системы, закреплённой на Земле, каждая описывает за сутки окружность огромного радиуса, что противоречит закону в его формулировке.
2. **б)** Траектория всегда лишь траектория относительно тела отсчёта, так что слова закона о движении по прямой пусты, пока не названа система координат.
3. **б)** Эйнштейн называет систему координат галилеевой, когда её состояние движения таково, что относительно неё справедлив закон инерции; неподвижные звёзды в такой системе не кружат.
4. **б)** Законы механики Галилея и Ньютона претендуют на справедливость только для галилеевой системы координат, поэтому орбиты вычисляют в такой системе, а потом переводят на вращающуюся Землю.

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 описания движения, 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 движутся по окружностям. Система координат, в состоянии движения которой справедлив закон инерции, — галилеева система координат, и законы механики Галилея и Ньютона претендуют на справедливость только для таких систем.

3. Приятель говорит, что закон инерции попросту ложен, раз звёзды явно движутся по окружностям 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 инерции 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.