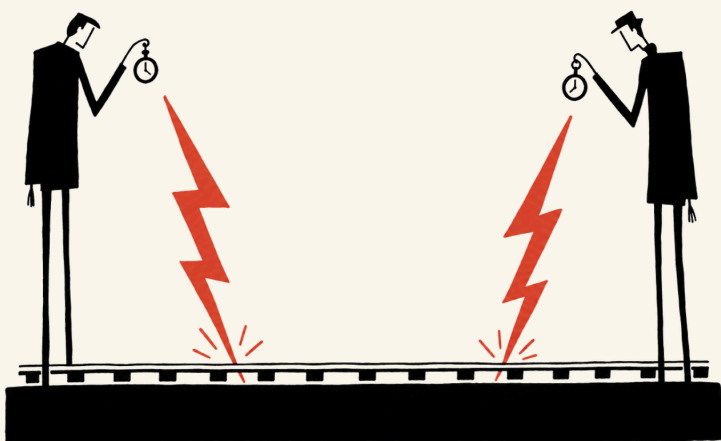


О специальной и общей теории относительности



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

Верна ли теорема Пифагора?

Где облако?

Один камень, две траектории

Какие тела отсчёта допустимы?

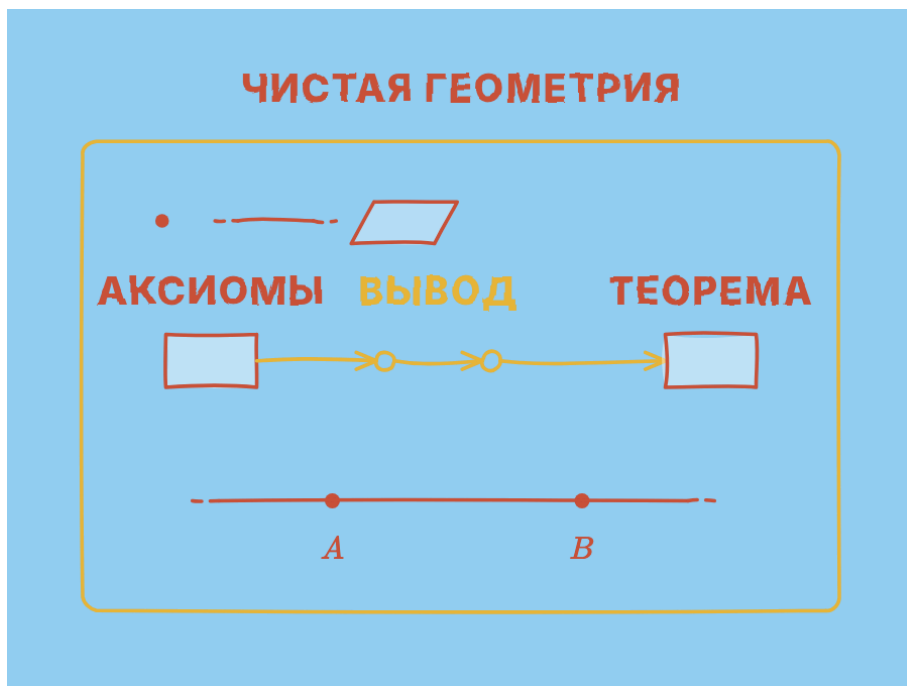
Верна ли теорема Пифагора?

Возьмите лист бумаги в клетку и линейку. Начертите в углу прямой угол, отмерьте три сантиметра вдоль одной стороны и четыре вдоль другой и соедините концы прямой линией. Теперь измерьте эту наклонную линию. Ещё не взглянув, вы уже знаете, что покажет линейка: пять сантиметров, потому что в школе вы учили, что квадрат на длинной стороне прямоугольного треугольника равен двум квадратам на коротких сторонах, а девять плюс шестнадцать даёт двадцать пять, корень из которого пять. Линейка соглашается, с точностью до толщины карандашной линии. Так был ли Пифагор прав, и истинна ли его теорема?

Альберт Эйнштейн начинает свою небольшую книгу об относительности именно с этого вопроса, и задаёт его с улыбкой. Большинство из нас, говорит он, познакомились с геометрией Евклида в детстве и вспоминают её с большим уважением, чем любовью: по её высоким лестницам нас гоняли добросовестные учителя. Из верности той школе мы отнеслись бы с презрением к любому, кто усомнился бы в самой скромной из её теорем. И всё же наша гордая уверенность могла бы испариться в ту минуту, когда кто-нибудь спросил бы, что мы имеем в виду, называя теорему истинной.

Посмотрите, как устроена геометрия. Она начинается с нескольких основных понятий, таких как точка, прямая и плоскость, которые мы представляем себе более или менее ясно, и с нескольких простых утверждений о них, аксиом, которые мы

принимаем, потому что эти представления делают их очевидными. Всё остальное выводится из аксиом логическими шагами, и этот вывод и есть доказательство. Итак, внутри геометрии теорема истинна, когда она правильно выведена из аксиом, и ничего другого слово «истинна» там означать не может. Вся тяжесть истины ложится тогда на аксиомы, и здесь Эйнштейн делает первое неожиданное замечание: на вопрос, истинна ли аксиома, геометрия ответить не может, и на самом деле этот вопрос вовсе лишён смысла.



Что устанавливает доказательство

Попробуйте спросить, истинно ли, что через две точки проходит только одна прямая. Не получится, потому что евклидова геометрия просто имеет дело с некоторыми объектами, которые

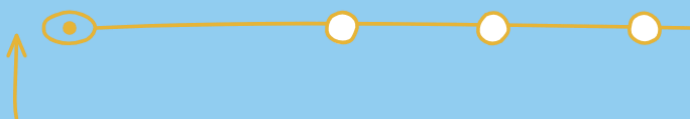
она называет прямыми, и по определению наделяет их свойством задаваться двумя своими точками. Слово «истинный», замечает Эйнштейн, в конечном счёте всегда означает согласие с какой-то реальной вещью. Чистая геометрия ничего не говорит о реальных вещах; она лишь о том, как её собственные понятия логически связаны друг с другом. Поэтому слово не подходит.

Отчего же мы так уверены, что теоремы истинны? Оттого, что понятия геометрии выросли из предметов природы, которые соответствуют им более или менее точно. Геометрия может держаться от этих предметов в стороне, чтобы сохранить свою логику безупречной, но привычка видеть в отрезке две метки на практически твёрдом теле, линейке или стержне, сидит в нашем мышлении глубоко. Мы также считаем три места лежащими на одной прямой, когда, глядя одним глазом с нужного места, можем заставить их совпасть так, что одно закрывает остальные.

ИДЕАЛЬНЫЙ ОТРЕЗОК



ТРИ КАРАНДАША



ВИД ГЛАЗОМ

Прямизна, проверенная глазом

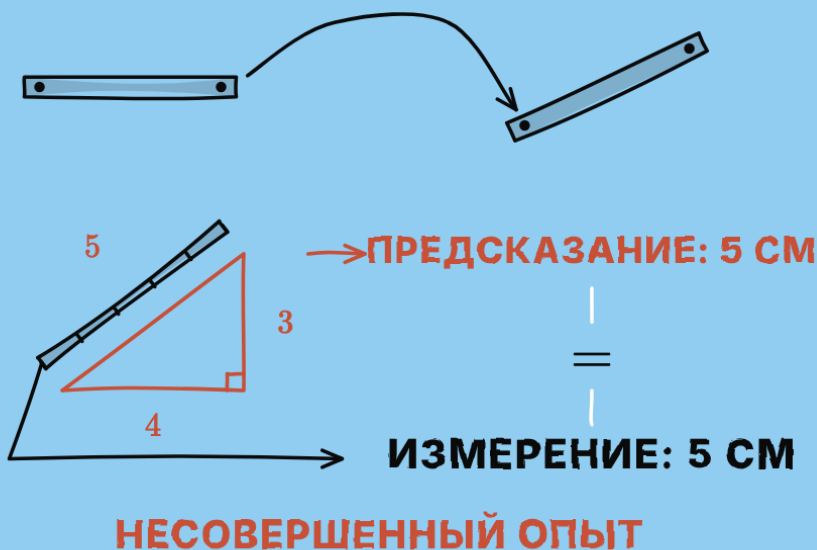
Опыт

Поставьте три карандаша вертикально в комочки пластилина примерно в ряд и закройте один глаз. Двигайте головой, пока ближний карандаш не закроет два других, так что все три сольются в один узкий силуэт. Это физическая проверка прямизны, сделанная глазом и реальными предметами, и именно это вы на самом деле имеете в виду, называя три предмета выстроенными в линию.

Теперь решающий шаг, и это одна добавленная фраза. К теоремам Евклида мы добавляем утверждение, что двум точкам

практически твёрдого тела всегда соответствует один и тот же отрезок, одно и то же расстояние, как бы мы ни перемещали тело. Ничего такого в чистой геометрии нет; это утверждение о линейках и стержнях и о том, как ведёт себя реальное вещество. Как только оно добавлено, теоремы геометрии становятся утверждениями о возможном расположении практически твёрдых тел, и дополненная так геометрия есть раздел физики. Теперь мы вправе спрашивать, истинны ли теоремы, потому что теперь можно спросить, верны ли они для реальных вещей, меток, кромок и стержней, которые мы сопоставили геометрическим понятиям. Несколько неточно, говорит Эйнштейн, истинность геометрической теоремы в этом смысле означает, что она подтверждается при построении циркулем и линейкой.

ФИЗИЧЕСКОЕ СОГЛАСИЕ



Геометрия становится физической проверкой

Именно это вы и сделали на клетчатой бумаге. Теорема была истинна в физическом смысле, потому что линейка, практически твёрдое тело, согласилась с предсказанием. То же самое происходит, в большом масштабе, всякий раз, когда ваш телефон определяет своё положение: приёмник превращает измеренные расстояния до нескольких спутников в точку на карте с помощью обычной геометрии, и метод считается верным потому, что найденное место совпадает с тем, где вы на самом деле находитесь. Геометрия зарабатывает свою физическую истинность так же, как любое физическое утверждение: проверкой на мире.

Эйнштейн добавляет одну оговорку, и это нить, которая ведёт через всю книгу. Наша убеждённость в том, что геометрия истинна в этом смысле, покоится не более чем на довольно несовершенном опыте; линейка никогда не бывает совершенно твёрдой, а глаз никогда не бывает совершенно прямым. Пока, говорит он, мы примем эту истинность как данность, а в последней части книги, когда дойдём до 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 самих аксиом там лишён смысла. Теоремы кажутся истинными, потому что понятия геометрии 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. Тогда теорема истинна, когда с ней согласны реальные тела: при построении циркулем и линейкой, на клетчатой бумаге с линейкой или в спутниковом приёмнике. Это согласие покоится на несовершенном опыте и пока принимается как данность; его границы проявятся в общей теории относительности.

Вопросы

1. Вы чертите прямоугольный треугольник три на четыре, и линейка показывает, что длинная сторона равна пяти сантиметрам. В каком смысле теорема показана истинной?
 - a. В смысле чистой геометрии, потому что измерение подтверждает аксиомы
 - b. В физическом смысле, потому что практически твёрдое тело согласилось с предсказанием
 - c. Ни в каком, потому что линейка никогда не бывает совершенно твёрдой
2. Почему Эйнштейн говорит, что вопрос об истинности аксиомы лишён смысла?
 - a. Потому что аксиомы выбраны по соглашению математиков
 - b. Потому что «истинный» означает согласие с реальной вещью, а чистая геометрия ничего не говорит о реальных вещах
 - c. Потому что никто ещё не нашёл способа доказать аксиому
 - d. Потому что аксиомы слишком очевидны, чтобы их оспаривать
3. Что даёт одно добавленное утверждение о практически твёрдых телах?
 - a. Оно делает теоремы геометрии утверждениями о реальных стержнях и линейках, и геометрия становится

разделом физики

b. Оно доказывает аксиомы Евклида из опыта

c. Оно показывает, что геометрия не зависит от всякого опыта

d. Оно заменяет аксиомы измерениями

4. Почему физическая истинность геометрии принимается, по лекции, лишь пока?

a. Потому что построения циркулем и линейкой никогда не завершаются

b. Потому что спутниковый приёмник иногда даёт неверное положение

c. Потому что она покоится на довольно несовершенном опыте, а общая теория относительности покажет её границы

Ответы

1. b) Теорема была истинна в физическом смысле, потому что линейка, практически твёрдое тело, согласилась с предсказанием; внутри чистой геометрии никакое измерение не имеет отношения к теореме.

2. b) Слово «истинный» в конечном счёте всегда означает согласие с какой-то реальной вещью, а чистая геометрия лишь о том, как её собственные понятия логически связаны, поэтому слово не подходит.

3. a) Добавьте, что две точки практически твёрдого тела сохраняют один и тот же отрезок, как бы тело ни перемещали, и теоремы станут утверждениями о возможном расположении таких тел; дополненная так геометрия есть раздел физики.

4. с) Наша убеждённость покоится не более чем на довольно несовершенном опыте; Эйнштейн пока принимает эту истинность как данность и в последней части книги показывает, что у неё есть границы, и где они.

Задачи

1. Приятель говорит: «Теорема Пифагора верна, я проверил её линейкой». Объясните, в каком смысле слова «верна» приятель прав, а в каком он не проверил ничего.

Подсказка: Отделите теорему как утверждение, выведенное из аксиом, от теоремы как утверждения о линейке и листе бумаги.

Ответ: В физическом смысле приятель прав: как только мы добавили, что линейка есть практически твёрдое тело, метки которого сохраняют расстояние, теорема стала утверждением о реальных отрезках, и линейка с ней согласилась. 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 спросить, проходит ли через две точки только одна прямая, тогда как спросить, совпадает ли измеренная диагональ с вычисленной, можно?

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

Ответ: Первое утверждение принадлежит чистой геометрии, которая имеет дело с объектами, называемыми прямыми, и наделяет их этим свойством по определению; спросить, истинно ли оно, значило бы спросить о согласии с реальной вещью, а чистая геометрия не о реальных вещах. Второй вопрос — о метках на твёрдой линейке и листе бумаги, реальных вещах, сопоставленных

геометрическим понятиям, так что согласие или несогласие с ними имеет смысл.

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

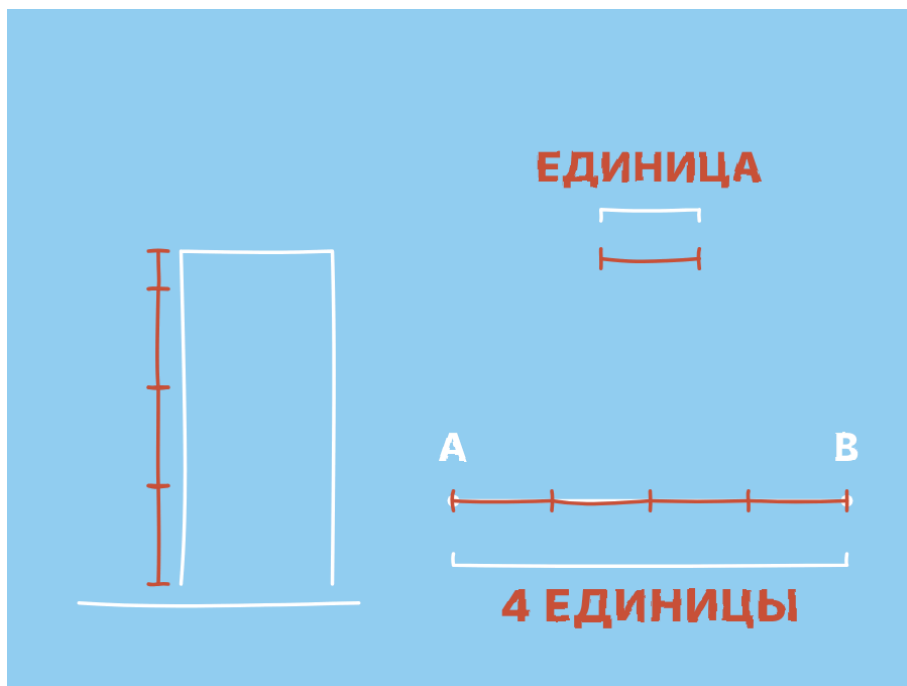
Подсказка: Подумайте о том, что такое на самом деле линейка и прицеливающийся глаз.

Ответ: Линейка 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 как данность и в последней части книги, об общей теории относительности, показать, что у него есть границы, и где они.

Где облако?

Измерьте высоту двери короткой деревянной линейкой.

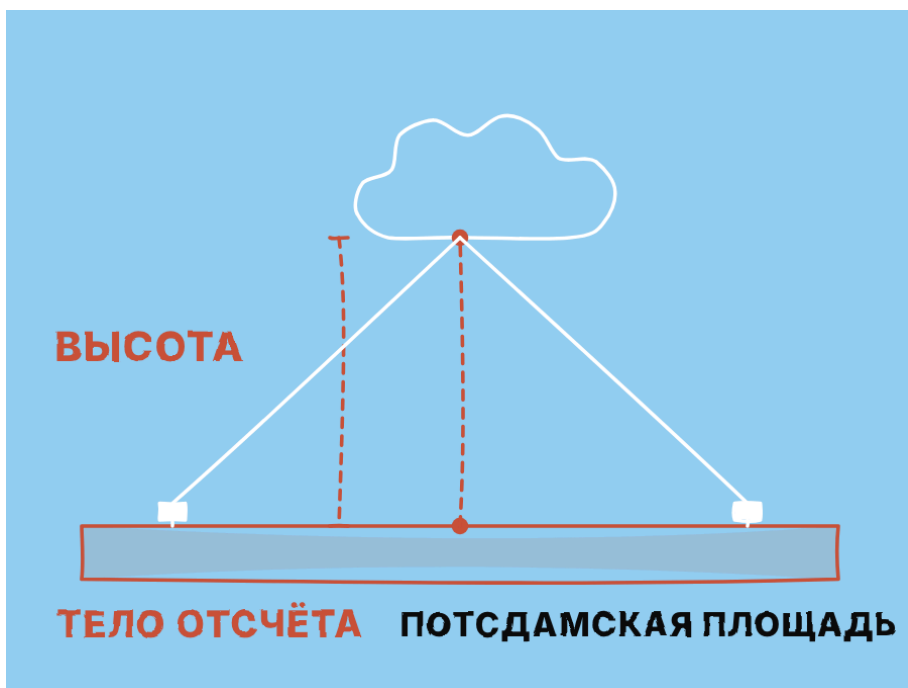
Поставьте её на пол у косяка, отметьте большим пальцем, где она кончается, поднимите, поставьте на отметку и считайте: одна, две, три длины линейки и немного сверх того. Этому вас никто не учил; это просто и есть измерение. Теперь взгляните вверх: над домом плывёт облако. Как бы вы измерили, где находится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



Длина повторением единицы

Сначала линейка. В прошлый раз мы договорились, что отрезок — это две метки на практически твёрдом теле; теперь возьмите один такой отрезок, небольшой стержень, и условьтесь раз и навсегда пользоваться им как единицей меры. Чтобы измерить расстояние между двумя точками твёрдого тела, постройте соединяющую их прямую, как учит геометрия, и укладывайте единичный стержень вдоль неё от первой точки снова и снова, пока не дойдёте до второй. Число раз, которое вам пришлось его уложить, и есть мера этого расстояния. Всякая рулетка, всякая мерная цепь землемера и всякий лазерный дальномер сводятся в конце концов к этому счёту повторяемой единицы.

Теперь вопрос «где». Всякое указание, где находится событие или вещь, говорит Эйнштейн, называет точку некоторого твёрдого тела, с которой событие совпадает. Это твёрдое тело — тело отсчёта, и так устроена повседневная речь не меньше, чем наука. Скажите: «в Берлине, на Потсдамской площади». Поверхность Земли — твёрдое тело, к которому относится указание, Потсдамская площадь — отмеченная точка на ней с названием, и событие находится в этой точке.

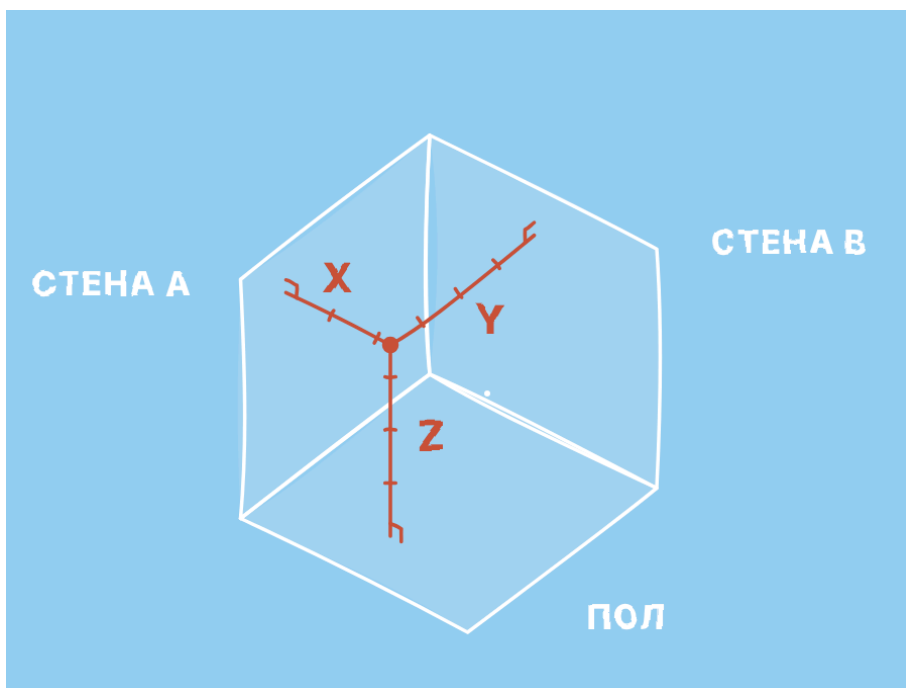


Продолжение тела отсчёта

У этого первобытного способа указывать место два ограничения. Он знает только места на поверхности твёрдого тела, и ему нужно, чтобы на этой поверхности были различимые точки с названиями. Вот тут и появляется облако. Чтобы сказать, где оно, представьте себе шест, поставленный на площади вертикально и достаточно высокий, чтобы коснуться облака. Длина шеста, измеренная единичным стержнем, вместе с местом основания шеста полностью говорит, где находится облако. По существу в указании ничего не изменилось: оно по-прежнему называет точку твёрдого тела, с которой облако совпадает, только твёрдое тело продолжено вверх шестом.

В этом шесте скрыты три уточнения, и Эйнштейн извлекает их одно за другим. Твёрдое тело отсчёта продолжено так, чтобы достичь предмета, который нужно локализовать. Число, измеренная длина шеста, заменило именованную примету. И о высоте облака мы говорим даже тогда, когда никакого шеста не построено: облако фотографируют с нескольких мест 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 от именованных примет с помощью измеренных чисел. Измеряющая физика делает это с помощью декартовой системы координат, названной по имени Декарта. Представьте себе три жёсткие плоские стенки, каждая под прямым углом к двум другим, соединённые в одно твёрдое тело, как две стены и пол, сходящиеся в углу комнаты. Место любого события задаётся тогда тремя числами, его координатами: длинами трёх перпендикуляров, опущенных из события на три стенки. Каждая находится, в принципе, укладыванием единичного стержня вдоль перпендикуляра, построением, которое следует правилам евклидовой геометрии.



Три расстояния задают место

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 расстояния, три счёта линейкой, и его место закреплено 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 физический смысл каждого такого указания должен всегда быть тем, что мы только что описали, стержнями, приложенными 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. И это отнесение предполагает, что для отрезков справедлива евклидова геометрия, где отрезок — две метки 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. Сказать, где что-то находится, значит назвать точку твёрдого тела отсчёта, с которой оно совпадает, как Потсдамская площадь называет точку на поверхности Земли. Понятие места уточняется продолжением тела отсчёта, заменой именованных примет измеренными числами и разговором о длине даже тогда, когда стержень, который её измерил бы, 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 спутниковым сигналам, указание места означает именно это и предполагает, что евклидова геометрия верна для отрезков на твёрдых телах.

Вопросы

1. Из чего на самом деле состоит измерение расстояния между двумя точками твёрдого тела?
 - 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 означает «в Берлине, на Потсдамской площади», если взглянуть на это так, как лекция?
- а. Что событие находится на определённом расстоянии от центра Земли
 - б. Что у события три координаты, измеренные от стен комнаты
 - с. Что событие совпадает с именованной точкой твёрдого тела, поверхности Земли
 - д. Что на площади можно поставить шест, достигающий события
3. Высоту облака вычисляют по снимкам, сделанным с нескольких мест на земле. Какое это уточнение понятия места?
- а. Тело отсчёта продолжено настоящим шестом до облака
 - б. Число встало на место именованной приметы
 - с. О длине говорят, хотя стержень, который её измерил бы, так и не построен
 - д. Облако рассматривают как точку поверхности Земли
4. Почему Эйнштейн настаивает, что даже положение, найденное спутниковым приёмником, должно означать стержни, приложенные к твёрдому телу?
- а. Потому что сигналы никогда не бывают так точны, как стержни
 - б. Потому что без этого смысла результаты физики и астрономии расплывутся в неясность

с. Потому что три жёсткие стенки на практике всегда построены

Ответы

1. **а)** Вы строите прямую, соединяющую две точки, и укладываете вдоль неё единичный стержень от первой точки, пока не дойдёте до второй; число раз, которое вы его уложили, и есть мера расстояния.
2. **с)** Всякое указание, где что-то находится, называет точку твёрдого тела отсчёта, с которой оно совпадает; здесь поверхность Земли — тело отсчёта, а Потсдамская площадь — именованная точка на ней.
3. **с)** О высоте облака мы говорим даже тогда, когда никакого шеста не построено: по снимкам и зная, как распространяется свет, вычисляют, какой длины должен был бы быть шест, так что шест воображаемый, но его длина всё равно измерена.
4. **б)** Координаты находят косвенно, как высоту облака по снимкам, но их физический смысл должен всегда 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, что такое её три координаты и как каждую можно, в принципе, измерить.

Подсказка: Представьте стены и пол как три жёсткие стенки и спросите, что такое перпендикуляр от лампы к каждой из них.

Ответ: Две стены и пол — три взаимно перпендикулярные жёсткие плоскости, соединённые в одно твёрдое тело. Опустите из лампы перпендикуляр на каждую; длины этих трёх перпендикуляров и есть координаты. Каждая находится, в принципе, укладыванием

единичного стержня вдоль перпендикуляра и счётом, построением, которое следует евклидовой геометрии.

2. Назовите два ограничения первобытного способа указывать место и объясните, как шест на Потсдамской площади освобождает нас от каждого, не меняя того, что такое указание места.

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

Ответ: Он знает только места на поверхности твёрдого тела, и ему нужны именованные, различимые точки на этой поверхности. Шест продолжает твёрдое тело вверх, так что можно указать место вне поверхности; а измеренная длина шеста, число, заменяет именованную 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.

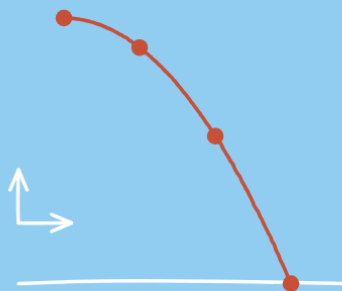
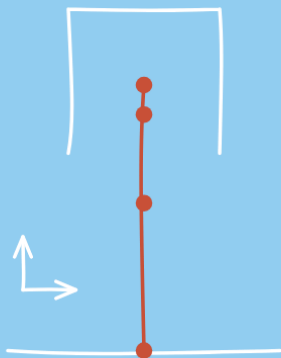
Ответ: Приёмник находит свои координаты косвенно, как высоту облака нашли по снимкам, но их смысл по-прежнему — длины трёх перпендикуляров к твёрдому телу отсчёта, длины, которые в принципе мог бы измерить стержень. Как и всякое пространственное описание, он предполагает, что евклидова геометрия верна для отрезков, где отрезок — две метки на твёрдом теле.

Один камень, две траектории

Сядьте у окна поезда, который плавно идёт по прямому пути с постоянной скоростью. Высуньте камень в окно и отпустите его, без всякого толчка. Если не считать воздуха, вы увидите, как он падает отвесно вниз, словно поезд стоит на месте, и ложится на насыпь под вами. А пешеход на тропинке у путей смотрит, 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. Один камень, два честных свидетеля, две разные траектории.

ДВА ТЕЛА ОТСЧЁТА

ВАГОН



ЗЕМЛЯ

Один камень, два тела отсчёта

Эйнштейн открывает этот параграф признанием. Если бы он сказал, не задумываясь, что механика должна описывать, как тела со временем меняют своё место в пространстве, он совершил бы, по его словам, смертные грехи против святого духа ясности. Грехи прячутся в двух коротких словах, «место» и «пространство», и 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 значит сказать, что камень движется «в пространстве»?

После прошлого раза, говорит Эйнштейн, ответ ясен. Слово «пространство», если быть честными, тёмное слово, с которым

мы не можем связать ровно никакого определённого представления, так что мы его отбрасываем. Вместо него мы говорим «движение относительно практически твёрдого тела отсчёта», а места относительно тела отсчёта — это ровно то, что определил предыдущий параграф. Для камня предлагаются два тела отсчёта, вагон и земля. Относительно вагона места лежат одно под другим, на прямой; относительно земли они лежат на параболе.

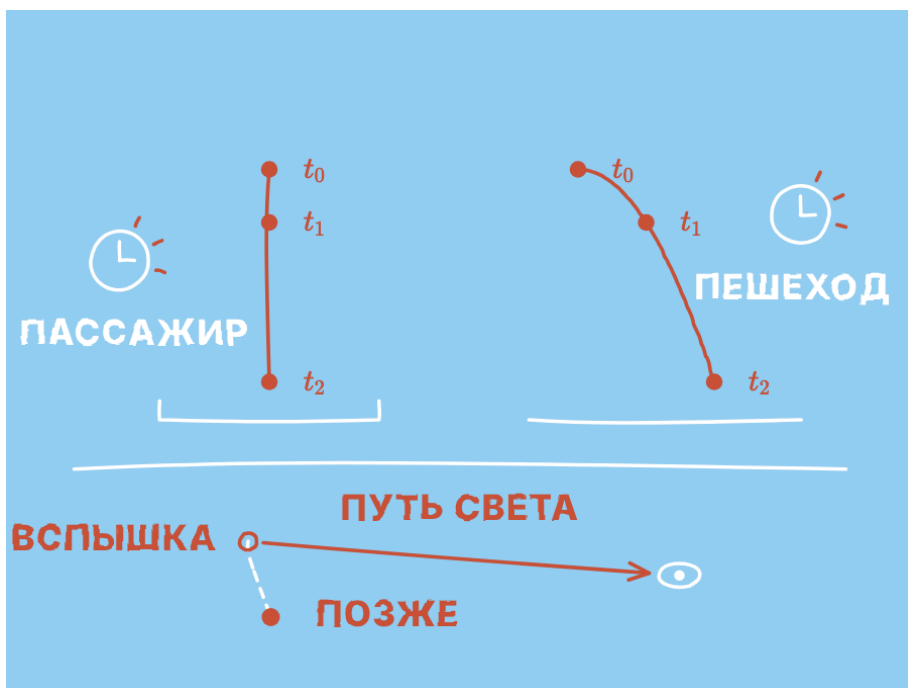
Поскольку система координат, три жёсткие стенки, есть математическая форма тела отсчёта, Эйнштейн говорит так: камень описывает прямую относительно системы координат, жёстко связанной с вагоном, и параболу относительно системы, жёстко связанной с землёй. Ни одна из траекторий не настоящая при другой иллюзорной. 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 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 на монету через окно: она всё время падения движется вперёд вместе с машиной, вычерчивая пологую дугу. Правы оба; вы просто отнесли места монеты к разным твёрдым телам, к машине или к дороге.

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, и приёмник молча выбрал одно из них за вас.

Траектория, даже с названным телом отсчёта, ещё не есть полное описание движения. Нужно ещё сказать, как тело меняет своё место со временем: для каждой точки траектории — 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 делает это так: двое совершенно одинаковых часов, одни в руке пассажира у окна, другие в руке пешехода. Каждый замечает, 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.



Места в паре с тиками часов

Эйнштейн заканчивает двумя тихими предостережениями, отложенными 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 этот отрезок книги останавливается там, где останавливается рассуждение Эйнштейна: геометрия, ставшая физической 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 тёмное слово «пространство» не заменено 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: 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 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 камню не придали толчка

- с. Ни та, ни другая: траектория существует лишь относительно выбранного тела отсчёта
2. Почему Эйнштейн отбрасывает слово «пространство» и говорит вместо этого о движении относительно практически твёрдого тела отсчёта?
- а. Потому что с «пространством» мы не можем связать никакого определённого представления, а места относительно тела отсчёта уже определены
 - б. Потому что пространство искривлено и его нельзя измерить стержнями
 - с. Потому что поезд и земля движутся в пространстве с разными скоростями
 - д. Потому что твёрдые тела легче нарисовать, чем пустое пространство
3. Траектория с названным телом отсчёта — ещё не полное описание движения камня. Чего не хватает?
- а. Массы камня и силы тяжести
 - б. Времени, в которое камень находится в каждой точке траектории, заданного как измеримая величина
 - с. Скорости поезда относительно земли
4. Как пассажир и пешеход в классической механике получают времена для своего описания падающего камня?
- а. Они договариваются об одних главных часах, поставленных на насыпи
 - б. Они вычисляют время по высоте, которую пролетел камень

- с. Каждый держит одни из двух одинаковых часов и замечает, где камень на его теле отсчёта при каждом тике
- д. Каждый измеряет, сколько времени свет от камня идёт до него

Ответы

1. **с)** Траектории самой по себе не существует; камень описывает прямую относительно системы координат, связанной с вагоном, и параболу относительно связанной с землёй, и ни одно описание не иллюзия.
2. **а)** Пространство, если быть честными, тёмное слово, с которым мы не можем связать ровно никакого определённого представления; места относительно тела отсчёта — ровно то, что определил предыдущий параграф.
3. **б)** Нужно ещё сказать, как тело меняет своё место со временем, для каждой точки траектории — в какое время тело там, и эти времена должны быть наблюдаемыми величинами, результатами измерений.
4. **с)** Двое совершенно одинаковых часов, одни у окна вагона, другие на тропинке; каждый наблюдатель замечает, 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?

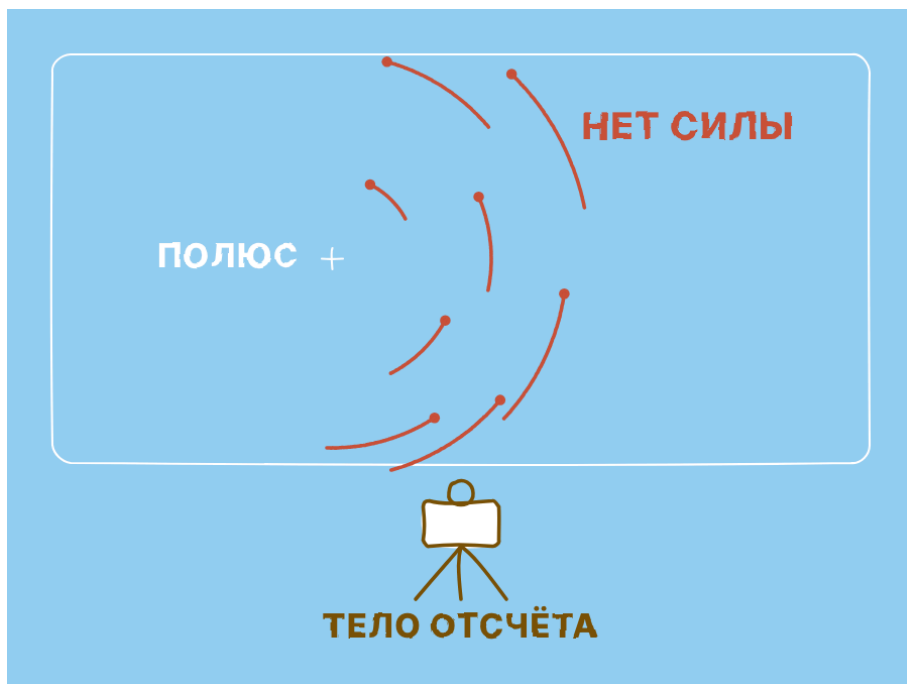
Подсказка: Спросите, как пешеход узнаёт, где камень в момент тика.

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?

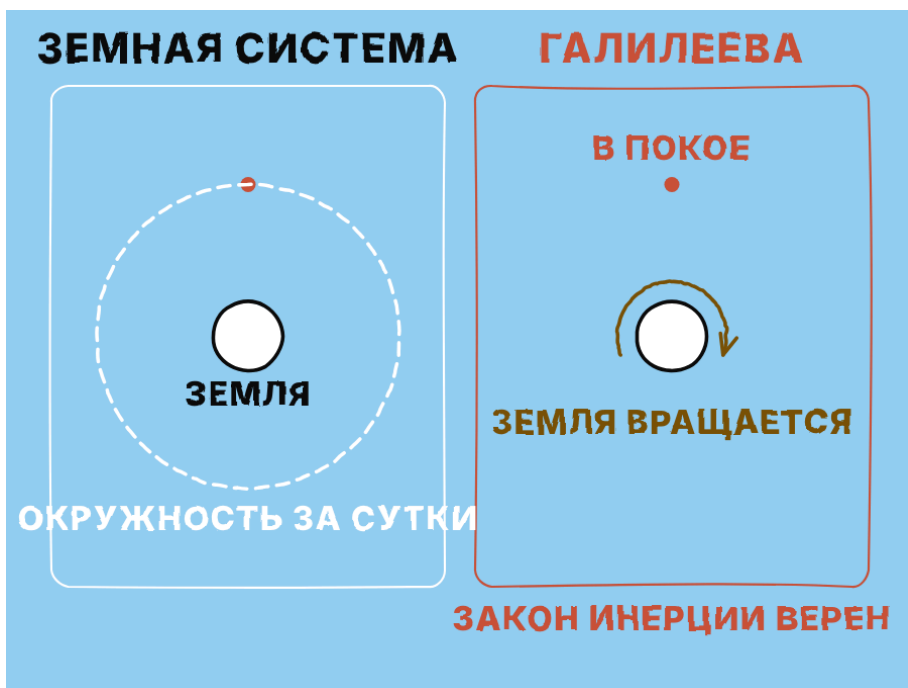
Поставьте камеру на штатив ясной ночью, наведите её на небо и оставьте затвор открытым на час. На снимке звёзды окажутся не точками, а дугами, кусками окружностей, проведённых вокруг одной точки неба. Никто не толкал эти звёзды; они так далеки от всего, что никакое притяжение, о котором стоило бы говорить, до них не доходит. И всё же относительно камеры и земли, на которой она стоит, каждая из них прошла по кривой. Эйнштейн использует именно это, чтобы решить, какими телами отсчёта физика может пользоваться.



Следы звёзд над камерой

Он начинает с закона инерции, первого закона механики Галилея и Ньютона: тело, достаточно далёкое от всех других тел, остаётся в покое или продолжает двигаться равномерно по прямой. Это звучит как утверждение о телах, но, говорит Эйнштейн, это в той же мере утверждение о телах отсчёта, о системах координат, которыми механика может пользоваться для описания движения. После камня из поезда мы знаем почему: траектория есть лишь траектория относительно тела отсчёта, так что «движется по прямой» ничего не говорит, пока тело не названо.

Видимые неподвижные звёзды — тела, к которым закон инерции должен применяться с большой точностью, ведь ничто не удалено от всего остального сильнее. Возьмите систему координат, жёстко связанную с Землёй, три стенки, закреплённые на земле. Относительно неё каждая неподвижная звезда описывает за одни астрономические сутки окружность огромного радиуса: ваш снимок. Это противоречит формулировке закона, обещавшей покой или прямую.



Земная система против галилеевой

Значит, чем-то одним придётся поступиться, и Эйнштейн сохраняет закон. Тогда движения можно относить только к 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. Законы механики Галилея и Ньютона претендуют на справедливость только для галилеевой системы координат. Вращающаяся Земля не вполне такая система; система, сохраняющая свои направления по далёким звёздам, — такая.

Спутники за приёмником вашего телефона отслеживаются именно в такой системе, с осями, направленными на

неподвижные звёзды, потому что только там их движения подчиняются простым законам; приёмник потом переводит ответ в место на вращающейся Земле. Так первые четыре параграфа приходят к остановке: геометрия, ставшая физической благодаря твёрдым телам, места как три числа на теле отсчёта, движение как траектория относительно такого тела и часов, а теперь и сами тела отсчёта разобраны, галилеевы допущены, остальные пока отложены. Это «пока» и есть то, с чего начинается остальная часть книги.

Запомним

Закон инерции, по которому тело, далёкое от всех других, остаётся в покое или движется равномерно по прямой, есть утверждение о телах отсчёта в той же мере, что и о телах. Относительно системы координат, закреплённой на Земле, неподвижные звёзды кружат раз в сутки, вопреки закону в его формулировке. Чтобы сохранить закон, движения относят только к системам координат, в которых неподвижные звёзды не кружат: к галилеевым системам координат, тем, в которых справедлив закон инерции. Механика Галилея и Ньютона претендует на справедливость только для галилеевых систем координат, и спутниковая навигация работает в такой системе, прежде чем переводить 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 кружат, вопреки формулировке закона инерции
 - c. Что закон инерции не выполняется для звёзд
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 прямая или покой — 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. Почему навигационные спутники отслеживаются в системе с осями, направленными на неподвижные звёзды?

- а. Потому что приёмник не может пользоваться земными координатами
- б. Потому что только в галилеевой системе координат движения подчиняются простым законам
- с. Потому что звёзды нужны, чтобы измерять расстояния до спутников

Ответы

1. **б)** Относительно системы, связанной с Землёй, каждая неподвижная звезда описывает за сутки окружность огромного радиуса, что противоречит обещанию закона: покой или прямая.
2. **б)** Траектория есть лишь траектория относительно тела отсчёта, так что слова закона о движении по прямой ничего не говорят, пока тело не названо.
3. **б)** Эйнштейн называет систему координат галилеевой, когда её состояние движения таково, что относительно неё справедлив закон инерции; неподвижные звёзды в ней не кружат.
4. **б)** Механика Галилея и Ньютона претендует 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, 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.