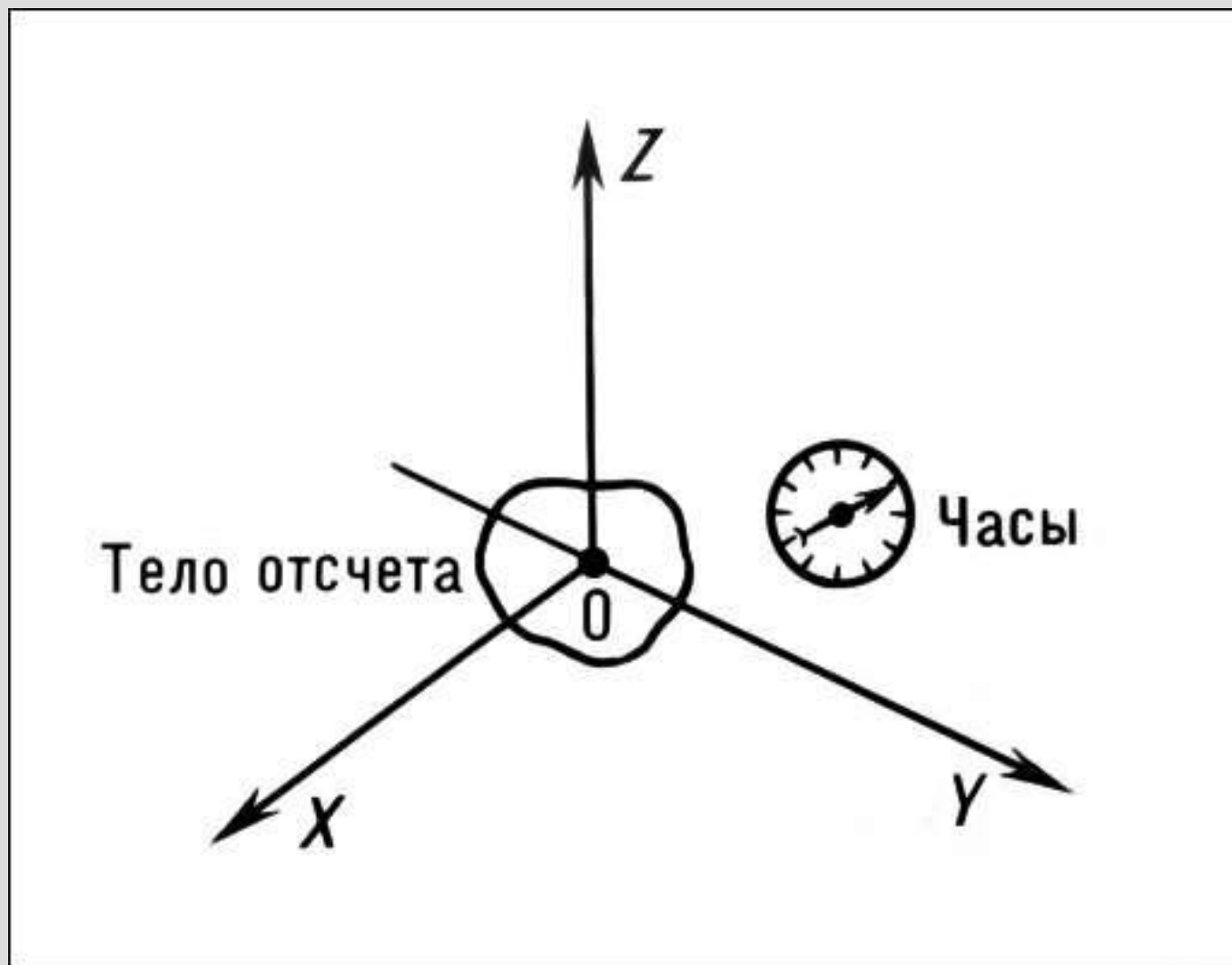


# **Специальная теория относительности.**

## Система отсчета

- Система отсчёта — это совокупность тела отсчёта, связанной с ним системы координат и системы отсчёта времени (часов), по отношению к которым рассматривается движение (или равновесие) каких-либо материальных точек или тел.

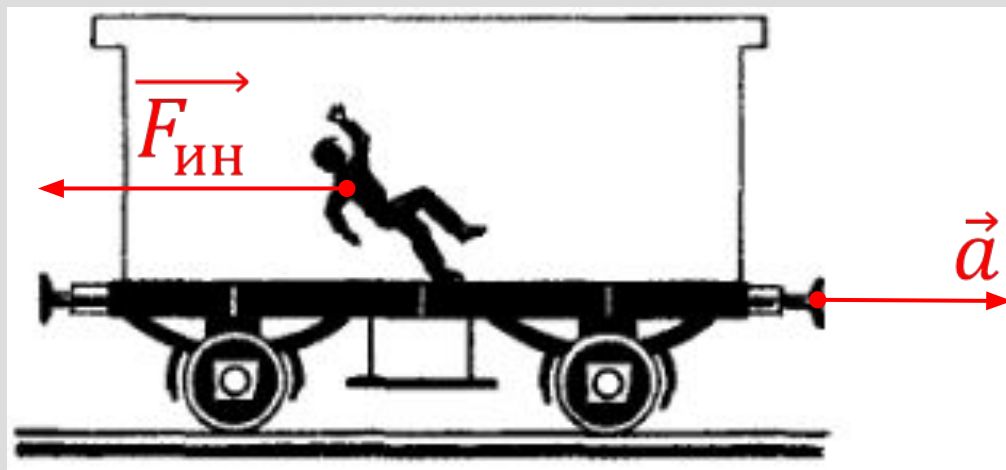
## Система отсчета



## Инерциальные и неинерциальные системы отсчета

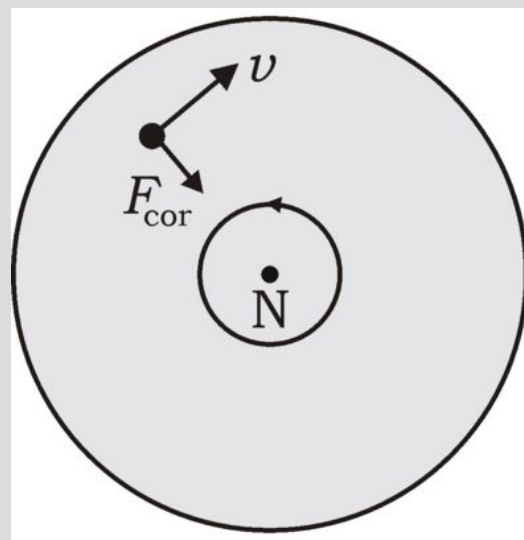
- Если в некоторой системе отсчета все тела, на которые не действуют внешние силы (свободные тела) движутся равномерно и прямолинейно, то такая система называется инерциальной(ИСО).
- Неинерциальной(НИСО) называется такая система, в которой свободные тела не движутся равномерно и прямолинейно.

# Силы, возникающие в НИСО



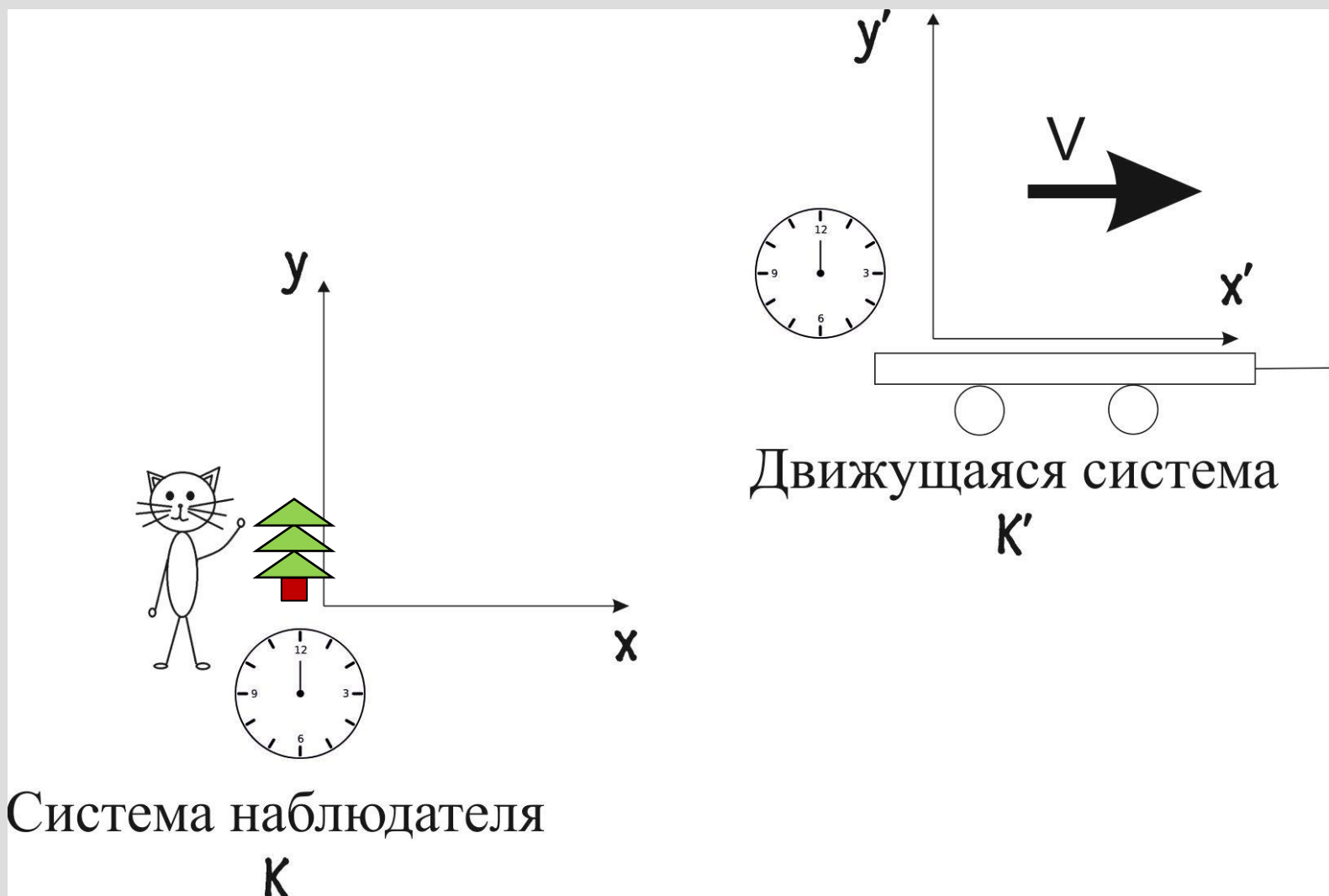
Сила инерции

Центробежная сила

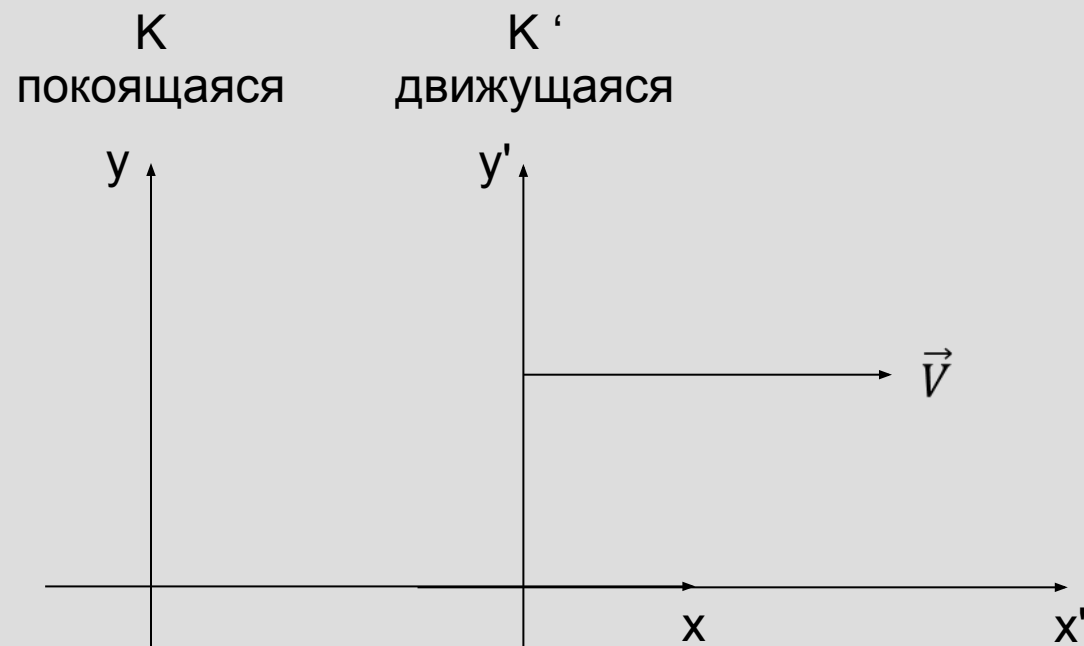


Сила Кориолиса

## Системы отсчета (принятые обозначения)



## К и К' системы

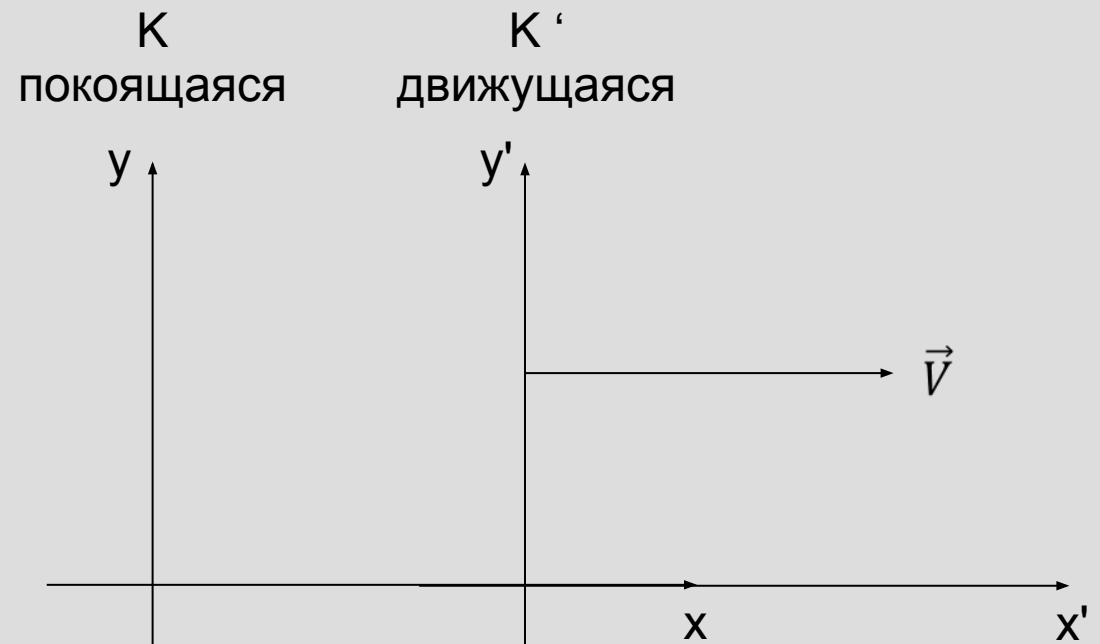


Система К' движется  
относительно системы К  
со скоростью  $V$ .

# Преобразования Галилея

Переход  
 $K \rightarrow K'$

$$\begin{cases} x' = x - V \cdot t; \\ y' = y; \\ t' = t; \end{cases}$$





## Принцип относительности

Все инерциальные системы отсчета являются эквивалентными.

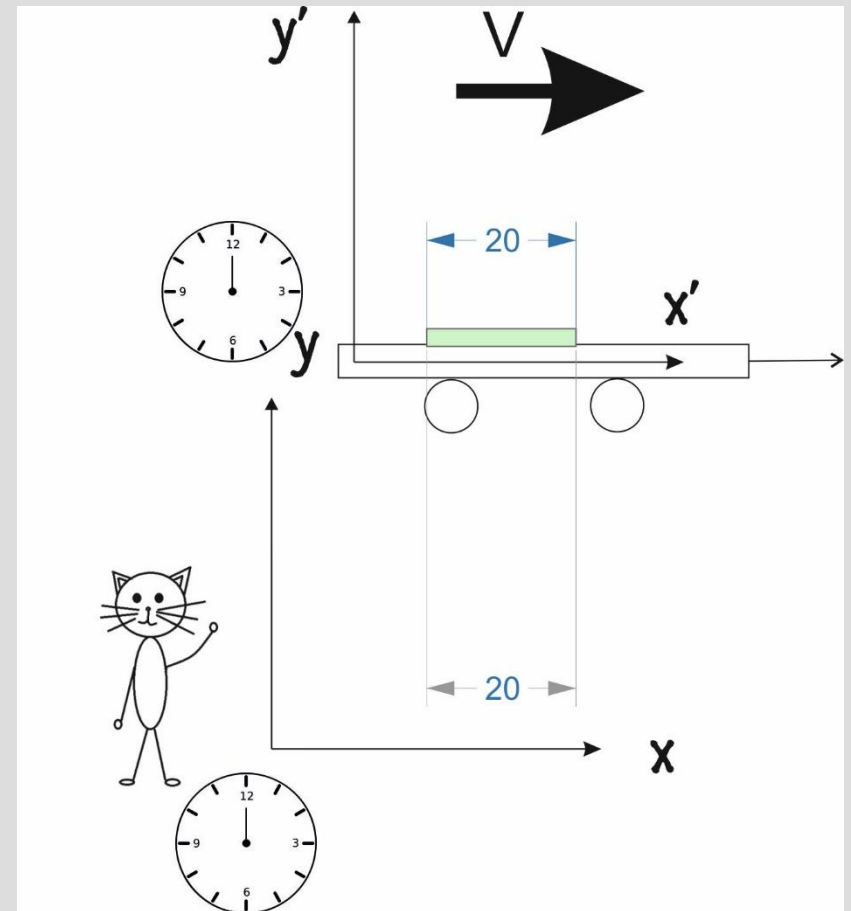
Иначе говоря, все физические явления протекают одинаково во всех системах отсчета.

Для перехода от одной ИСО к другой существуют преобразования координат и скоростей. В классической механике — это преобразования Галилея.

# Инвариантность

Инвариантность — неизменность величины по отношению к некоторым преобразованиям.

Например, длина предмета будет инвариантной относительно преобразований Галилея.



## Проблемы классической физики

- В конце 19 века оказалось, что уравнения Максвелла не инвариантны относительно преобразований Галилея. Голландский физик Хендрик Антон Лоренц ввел преобразования, относительно которых уравнения Максвелла инвариантны. Преобразования называли **преобразованиями Лоренца**.
- Опыты Майкельсона (первый опыт был в 1881 году) показали, что скорость света не зависит от направления движения Земли.
- В сентябре 1905 г. Альберт Эйнштейн публикует свою знаменитую работу «К электродинамике движущихся тел». Именно эта работа фактически знаменовала собой создание специальной теории относительности (СТО).

## Постулаты СТО

Из первого раздела работы «К электродинамике движущихся тел»:

*Дальнейшие соображения опираются на принцип относительности и на принцип постоянства скорости света. Мы определяем оба принципа следующим образом:*

- 1. Законы, по которым изменяются состояния физических систем, не зависят от того, к какой из двух координатных систем, находящихся относительно друга друга в равномерном поступательном движении, эти изменения относятся.*
- 2. Каждый луч света движется в покоящейся системе координат с определенной скоростью  $V$  независимо от того, испускается ли этот луч света покоящимся или движущимся телом.*

## Постоянство скорости света

- В СТО постулируется, что скорость света является постоянной вне зависимости от того, движется или покоится тело, испускающее луч света.
- О скорости света говорят как о скорости распространения взаимодействия (скорость некоторого «сигнала» взаимодействия). Прямолинейное движение со скоростью, превышающей скорость света, является невозможным.

## Преобразования Лоренца

- В СТО для перехода от одной ИСО к другой используются преобразования Лоренца\*:

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x - V \cdot t}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}; \\ y' = y; \\ t' = \frac{t - \left(\frac{V}{c^2}\right) \cdot x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \end{array} \right.$$

\* - Преобразования представлены для двумерного случая (движение на плоскости)

## Абсолютность времени.

- При переходе от одной ИСО к другой, время преобразуется согласно преобразованиям Лоренца.

Из этого можно заключить, что **в СТО время не является абсолютным.**

## Принцип соответствия.

В физике имеет место принцип соответствия.

Принцип соответствия говорит о том, что новые, более общие теории должны включать старые и проверенные теории в качестве предельного случая.

Переход от СТО к классической физике происходит посредством замены в преобразованиях Лоренца скорости света бесконечностью.



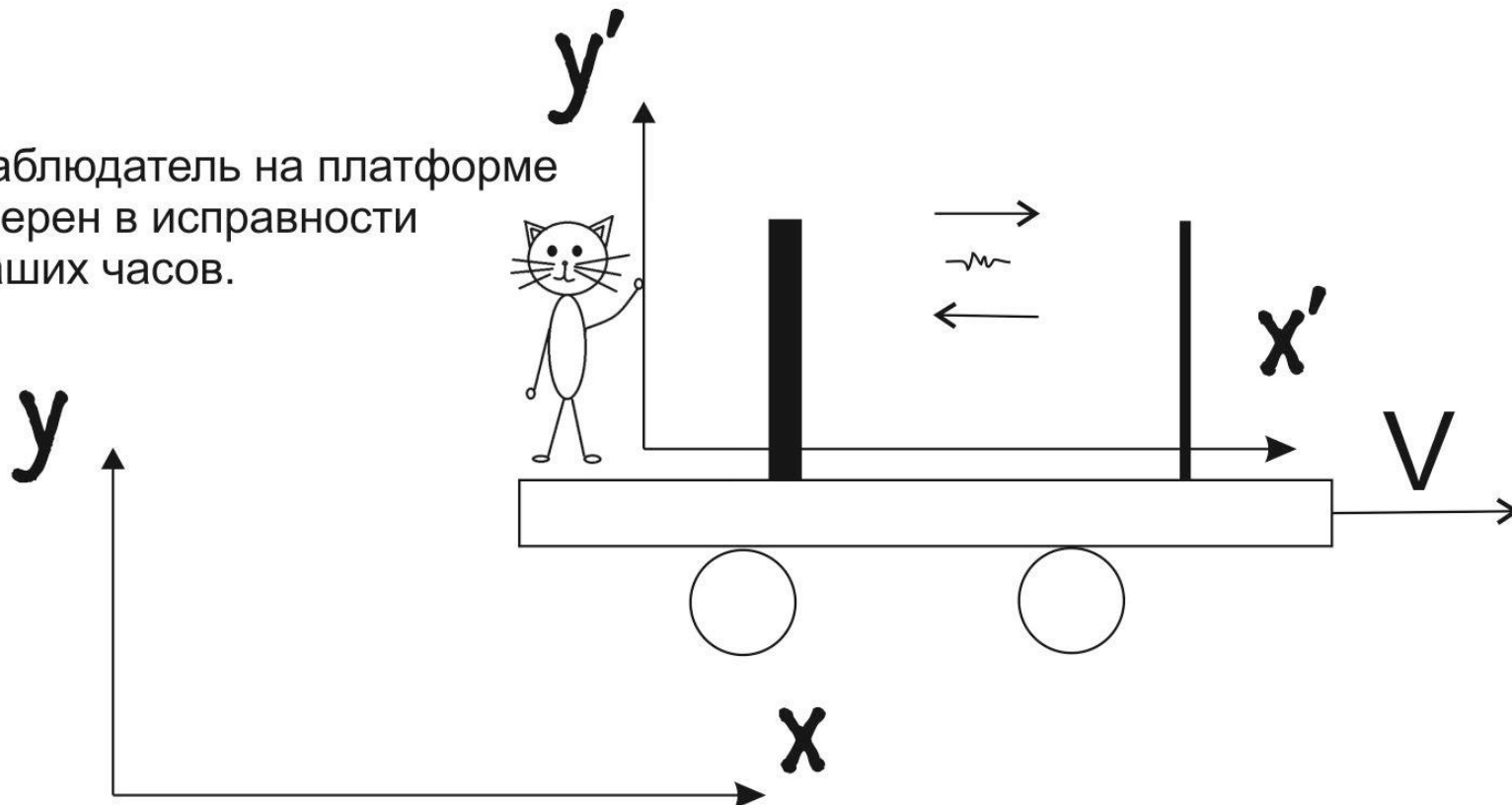
## Постоянство скорости света и следствия СТО

- О некоторых явлениях, которые следуют из логики специальной теории относительности можно судить исходя из одного лишь постулата о постоянстве скорости света.
- В дальнейших примерах платформа движется относительно некоторой неподвижной системы отсчета равномерно и прямолинейно, скорость движения платформы близка к скорости света.

# Замедление времени

На платформе работают «часы». Каждую секунду они посылают свет от источника к приемнику и получают его обратно.

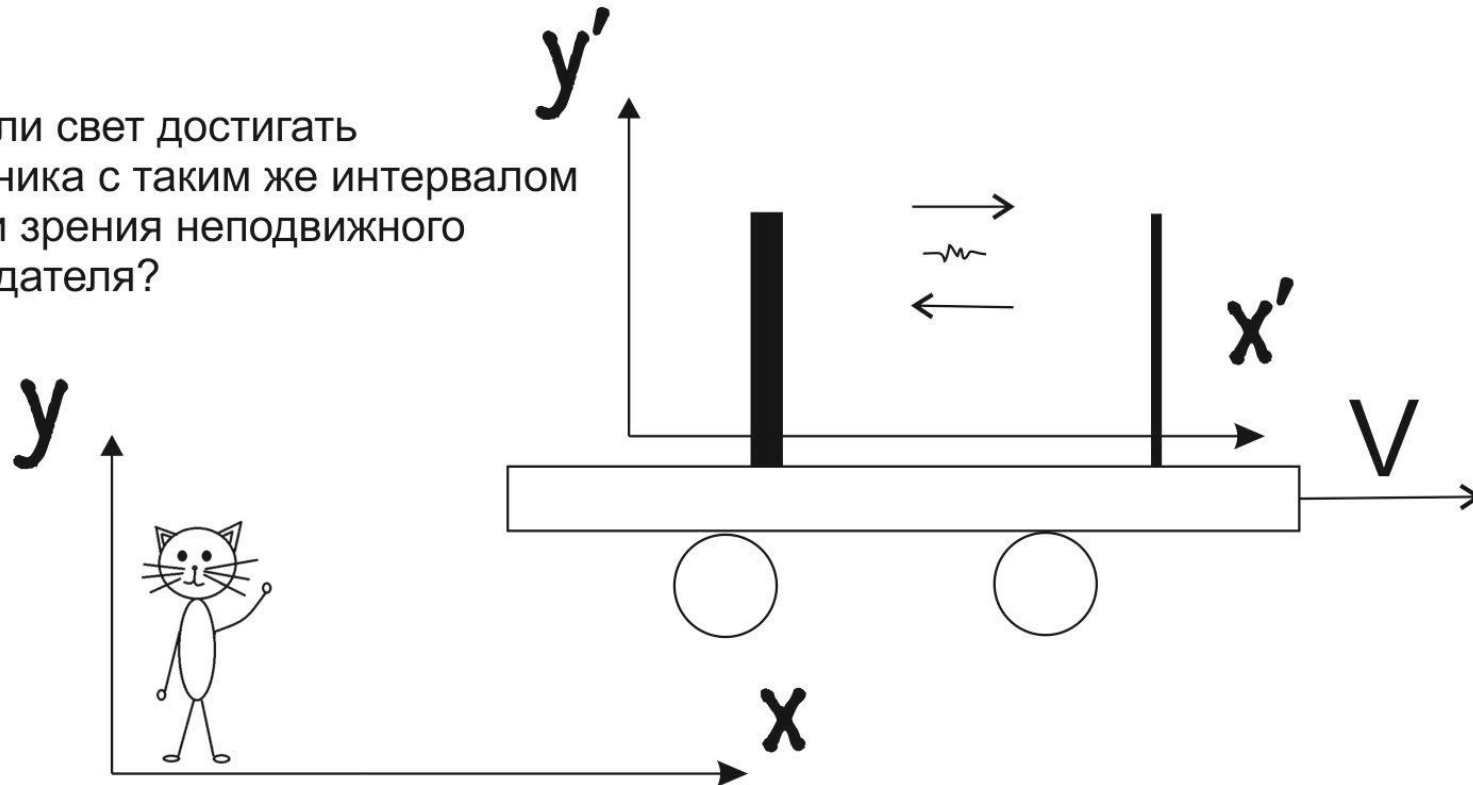
Наблюдатель на платформе уверен в исправности наших часов.



# Замедление времени

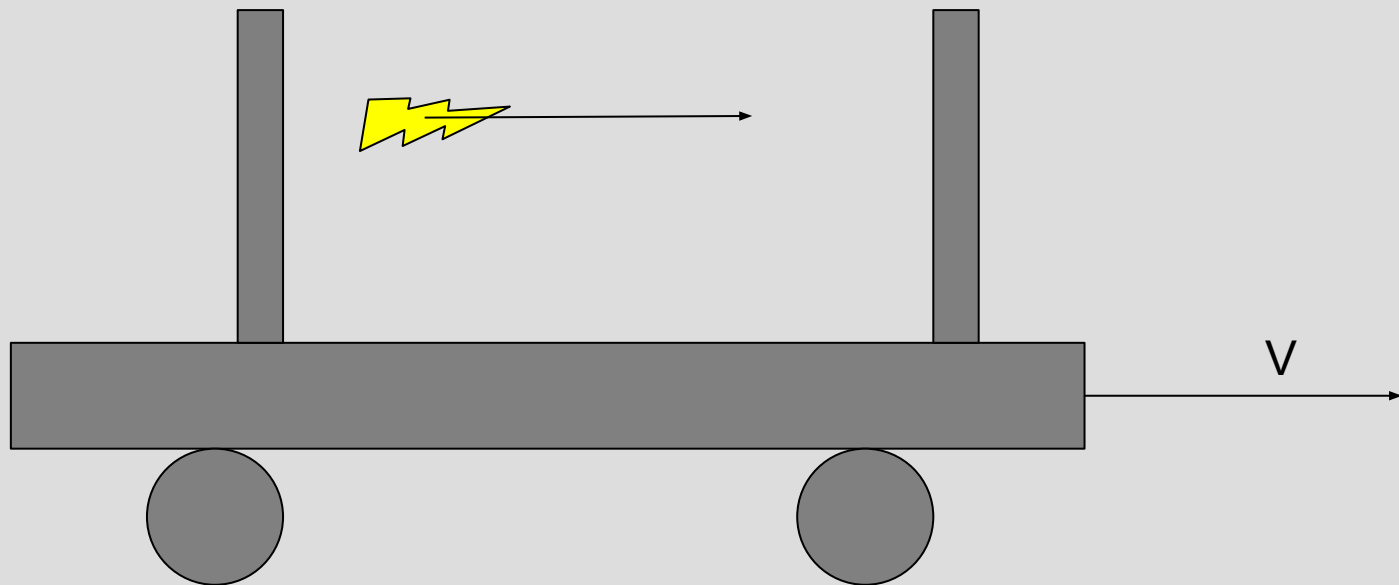
На платформе работают «часы». Каждую секунду они посылают свет от источника к приемнику и получают его обратно.

Будет ли свет достигать приемника с таким же интервалом с точки зрения неподвижного наблюдателя?



## Замедление времени

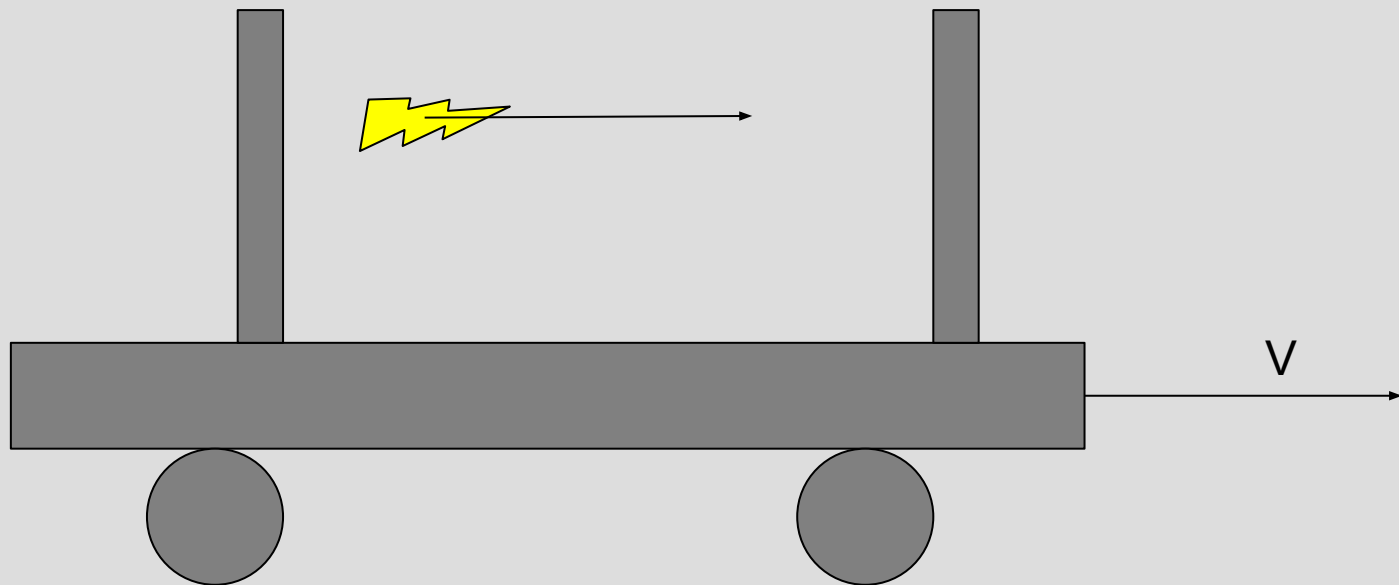
конечная скорость складывается из скорости света и скорости платформы



Поскольку платформа неизбежно движется со скоростью  $V$ , которая предполагается близкой к скорости света, предел скорости может быть достижим только лишь за счет замедления движения света относительно неподвижного наблюдателя.

## Замедление времени

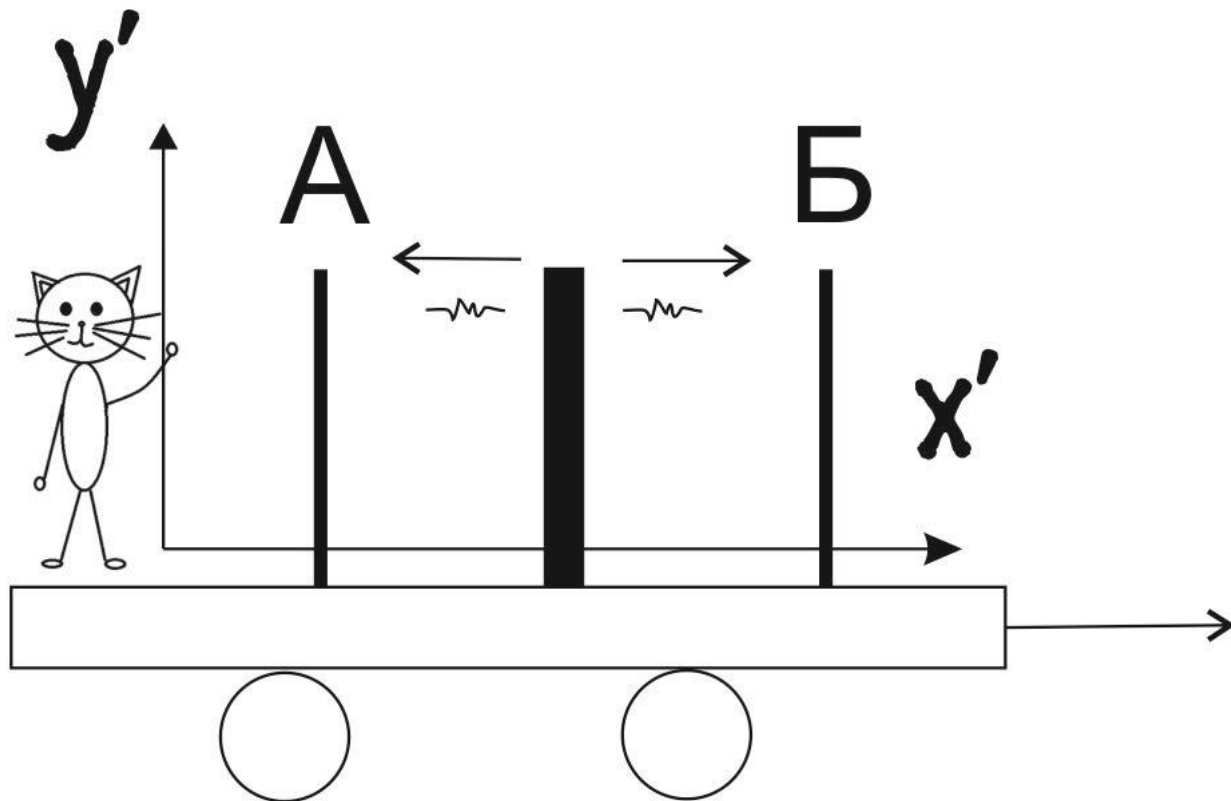
конечная скорость складывается из скорости света и скорости платформы



Поскольку платформа неизбежно движется со скоростью  $V$ , которая предполагается близкой к скорости света, а скорость частицы света всегда остается постоянной, неподвижный наблюдатель обнаружит эффект «замедления времени».

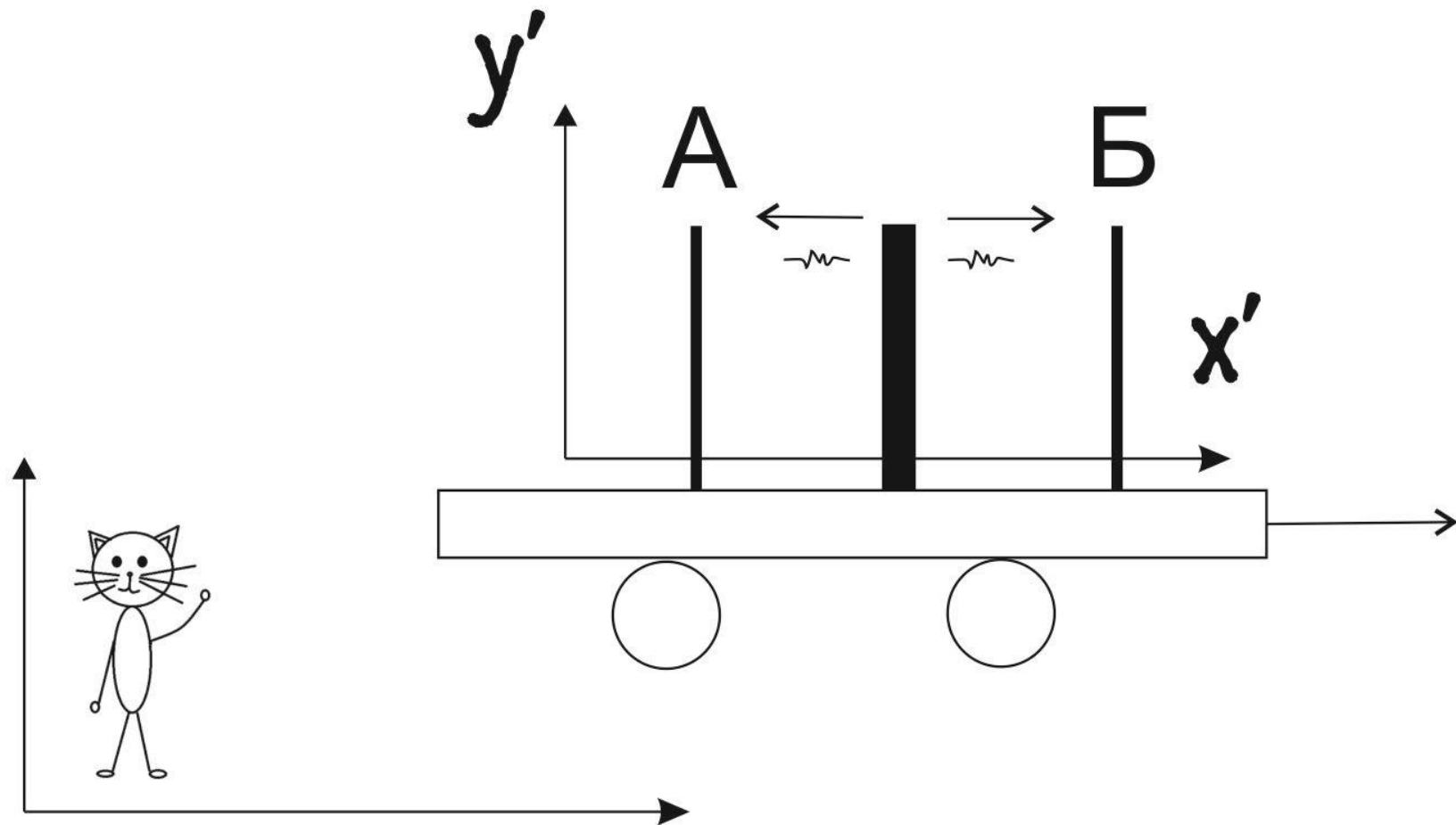
## Относительность одновременности

Центральный столб излучает свет.  
Свет достигнет целей А и Б одновременно



## Относительность одновременности

Центральный столб излучает свет.  
Достигнет ли свет обе цели одновременно?



## Явления, предсказываемые СТО

Согласно СТО, в движущейся системе отсчета неподвижный наблюдатель должен наблюдать следующие эффекты:

- Замедление времени.
- Сокращение длины предмета в направлении движения (Лоренцово сокращение длины).
- Одновременные события могут оказаться не одновременными (относительность одновременности).



## Энергия покоя

С точки зрения СТО каждое тело обладает энергией покоя:

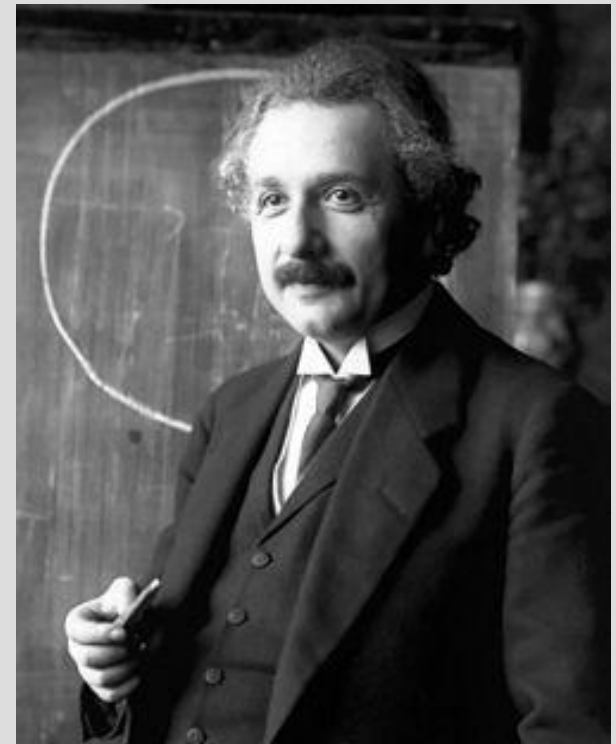
$$E = mc^2$$

Поскольку квадрат скорости света является постоянной величиной, мы можем говорить об **эквивалентности массы и энергии**.

## Основные идеи общей теории относительности

- Общая теория относительности (ОТО) — наиболее успешная из современных теорий гравитации, развивающая идеи СТО.
- Автором ОТО является Альберт Эйнштейн (1879-1955).

В слабых гравитационных полях предсказания ОТО совпадают с предсказаниями закона всемирного тяготения.



## Основные принципы ОТО

- Принцип равенства гравитационной и инертной масс
- Принцип общей ковариантности
- Принцип близкодействия
- Принцип причинности
- Принцип наименьшего действия
- Принцип сохранения энергии
- Принцип движения по геодезическим линиям

## Инертная и гравитационная массы.

Свойство тела сохранять свою скорость в отсутствие взаимодействия с другими телами называется *инертностью*. Физическая величина, являющаяся мерой инертности материальной точки или мерой инертности тела в поступательном движении, называется **инертной массой**.

Способность тел взаимодействовать в согласии с законом всемирного тяготения есть мера **гравитационной массы тела**.

# Лифт Эйнштейна



**1** Лифт стоит на поверхности Земли. Выпущенный из руки груз вследствие гравитационного притяжения падает на пол.



**2** Лифт свободно падает в шахте, где нет воздуха. Вместе с ним падает груз, не перемещаясь относительно лифта.



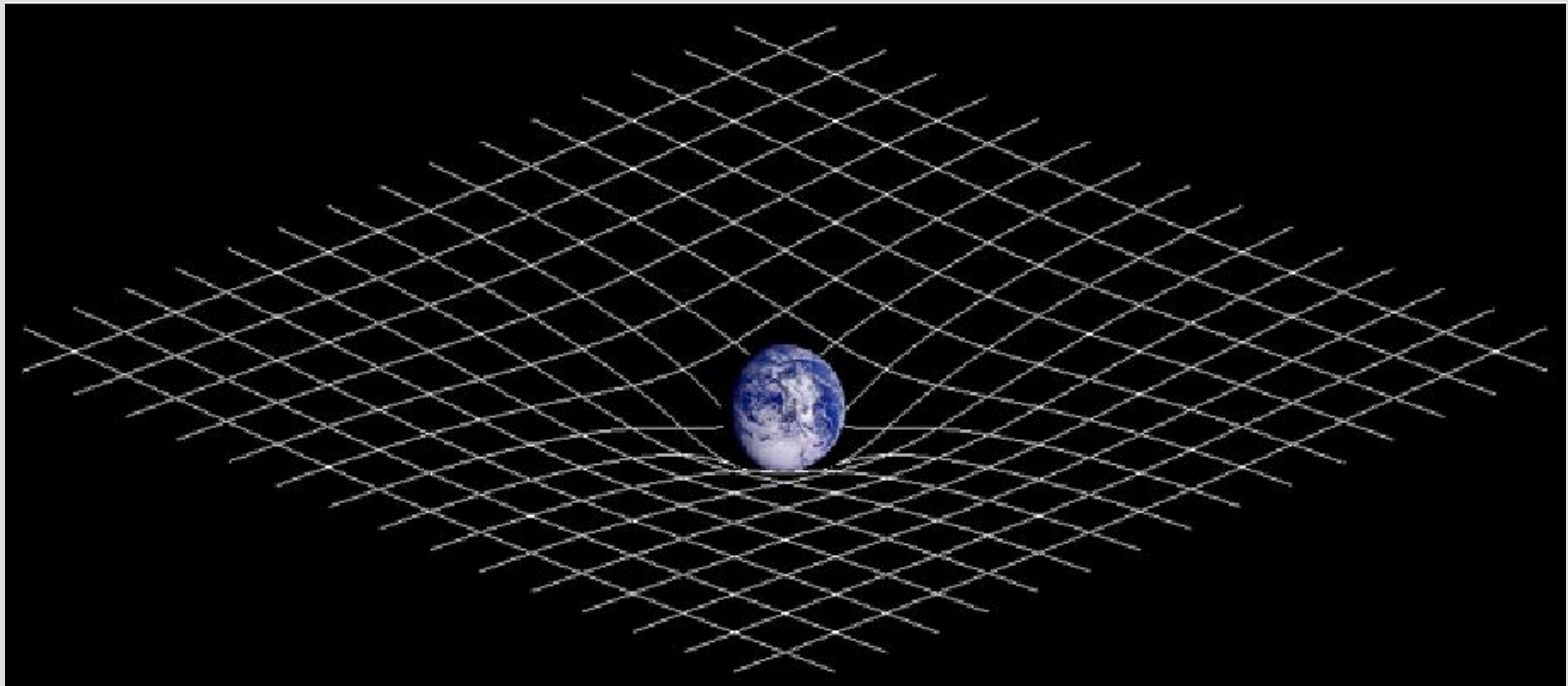
**3** Лифт в космосе ускоряется ракетным двигателем. Пол лифта ускоренно движется вверх; с точки зрения наблюдателя в лифте груз падает на пол.



**4** Лифт в космосе, не действуют никакие силы. Груз не движется относительно лифта.

## Принцип общей ковариантности

Математические уравнения, которые описывают законы природы должны быть справедливыми при преобразованиях к любым координатным системам.



## Принцип близкодействия

Согласно принципу близкодействия, скорость передачи взаимодействия конечна и равна скорости света в вакууме.

## Принцип движения по геодезическим линиям.

- Для сил гравитации ускорение тела и его траектория не зависят от массы и внутреннего строения тела. Это значит, что ускорение можно связать не со свойствами тел, а со свойствами самого пространства.
- Эйнштейн предположил, что все тела движутся по инерции, а их траекториями являются геодезические линии.



# Искривление пространства-времени

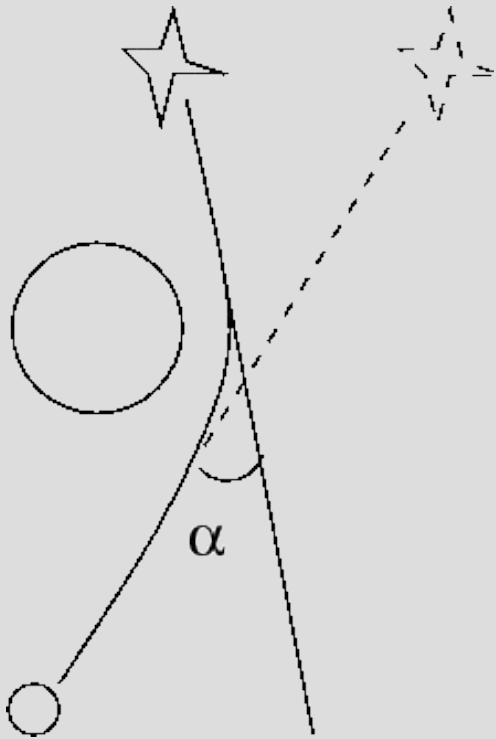


## Экспериментальные подтверждения ОТО

Экспериментальные подтверждения предсказаний ОТО:

- Гравитационное замедление времени (Gravity Probe A, GPS)
- Гравитационное красное смещение (было обнаружено в спектрах звёзд и Солнца, надёжно подтверждено в контролируемых земных условиях)
- Гравитационное отклонение света (подтверждено во время затмений, проверено наблюдениями квазаров)
- Дополнительный сдвиг перигелия орбиты Меркурия по сравнению с предсказаниями механики Ньютона

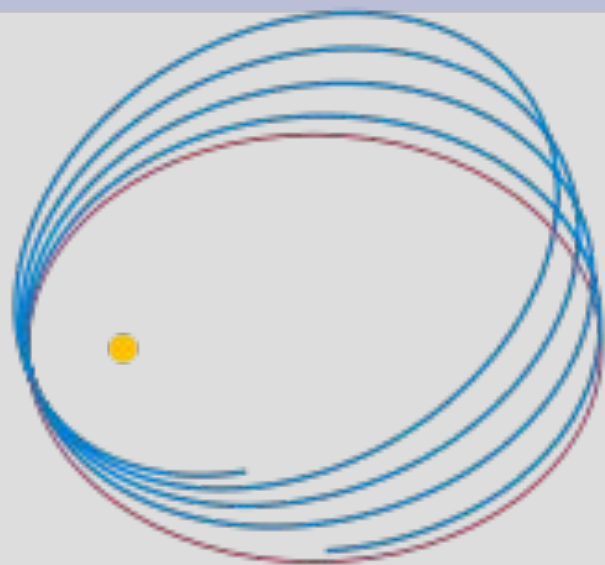
# Отклонение луча света в поле Солнца



$\alpha$  эксп. =  $(1,75)''$  точность около 0,3%  
(данные 1984г)

$\alpha$  расч. =  $(0,87)''$   
(согласно Ньютоновской  
корпускулярной теории света,  
Зольдерн, 1804г)

# Смещение перигелия



Орбита Ньютона (**красная**)  
и Эйнштейна (**голубые**)  
одной планеты  
вращающейся вокруг  
звезды

Смещение перигелия за 100 лет		
Планета	Эксперимент	Теория
Меркурий	$43, 11'' \pm 0, 45''$	$43, 0''$
Венера	$8, 4'' \pm 4, 8''$	$8, 6''$

**Спасибо за внимание!**