Концепции современного естествознания
Лекция 3

Теория относительности

Часть 1. СТО

Противоречия механики Ньютона и теории Максвелла

Передача взаимодействия

Принцип дальнодействия	Принцип близкодействия
Гравитация с **бесконечной** скоростью	Э/М волна с **конечной** скоростью $3 \cdot 10^8$ м/с

Не могут быть проявлением единого фундаментального взаимодействия – два **начала**

Противоречия

механики Ньютона

Принцип относительности

Никакими опытами по механике невозможно отличить движение от покоя

и теории Максвелла

Законы меняют свой вид при переходе от одной СО к другой – **неинвариантны**

Электромагнитная волна распространяется с **с одной и той же скоростью во всех системах отсчета**

Противоречия механики Ньютона

Принцип относительности

Никакими опытами по механике невозможно отличить движение от покоя. **Законы механики = физики инвариантны**

время
масса
ускорение
сила

Инвариантны – не меняются

Преобразования Галилея

координата,
скорость,
импульс,
кинетическая энергия

Противоречия

механики Ньютона и теории Максвелла

Принцип относительности

Законы меняют свой вид в разных СО

Преобразования Галилея

Неинвариантны

Электромагнитная волна распространяется **с одной и той же скоростью во всех системах отсчета**

Теория относительности

специальная

Для ИНЕРЦИАЛЬНЫХ систем отсчета

Принципы

1. Относительности
2. Постоянства ***c***

(*) Евклидовости пространства внутри одной СО

общая

Распространяется на НЕИНЕРЦИАЛЬНЫЕ систем отсчета

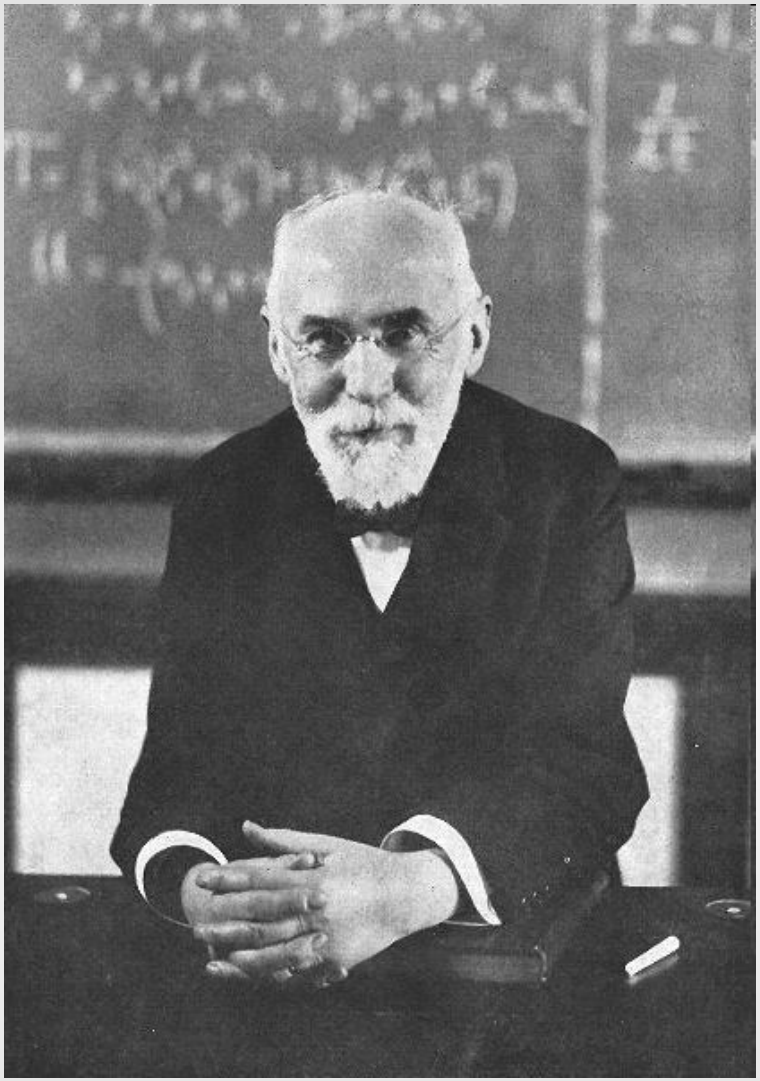
Принципы

1. Относительности
2. Постоянства ***c*** в отсутствие тяготения и ускорения
3. Эквивалентности тяготения и движения с ускорением

(*) Пр-во в неинерциальной СО неевклидово

1904

Преобразования Лоренца

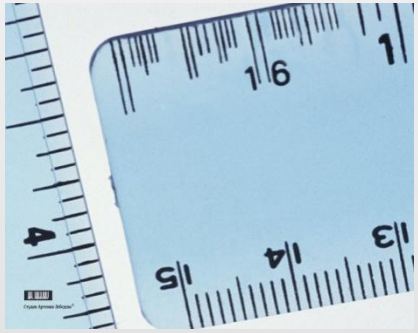


Хендрик Антон Лоренц (1853 – 1928)

Альберт Эйнштейн (1879-1955)

1905

«К электродинамике движущихся тел».



1. Принцип относительности

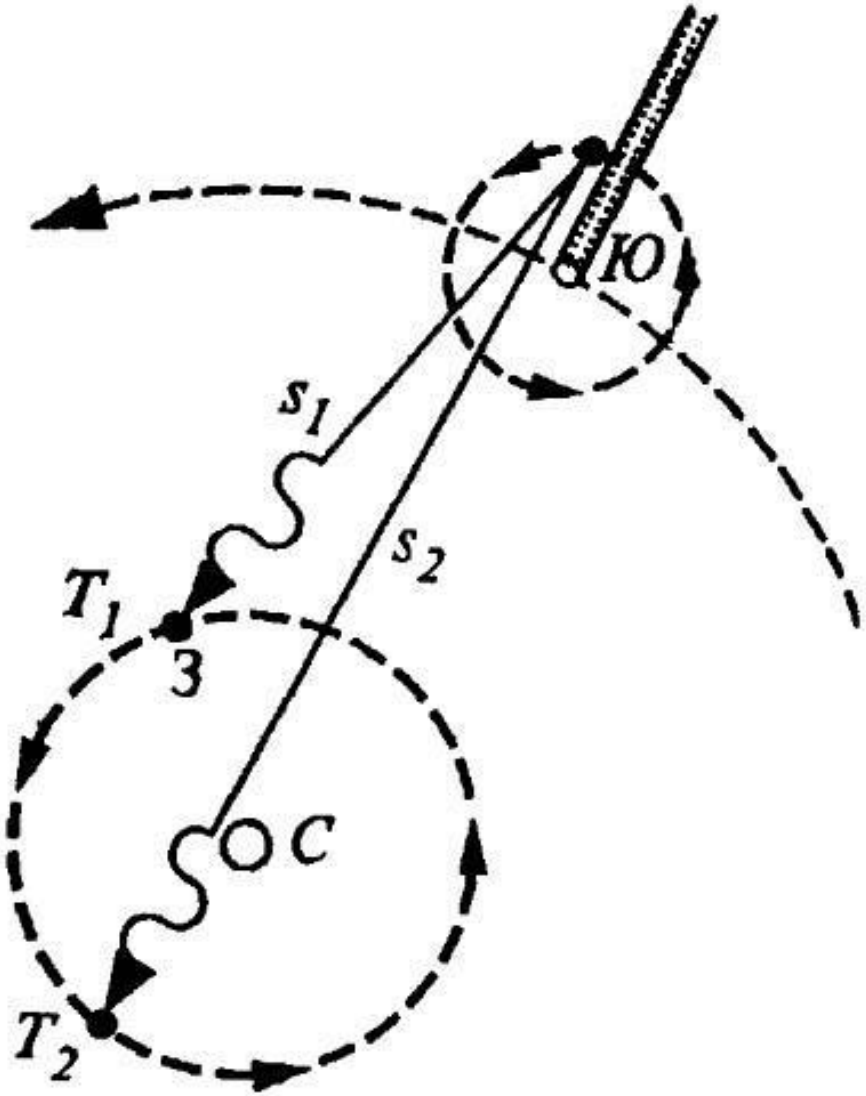
Эйнштейн не отказывается от принципа относительности Галилея

Наоборот, он делает его более общим – распространяет и на электромагнитное взаимодействие

Никакими опытами нельзя отличить движение от покоя.
В том числе измерением скорости света.

Откуда взялся постулат о постоянстве скорости света?

- Из теории – уравнений Максвелла
- Из проверки экспериментами
  - Майкельсон-Морли 1887
  - Физо 1851



27.

К определению скорости света Ремером

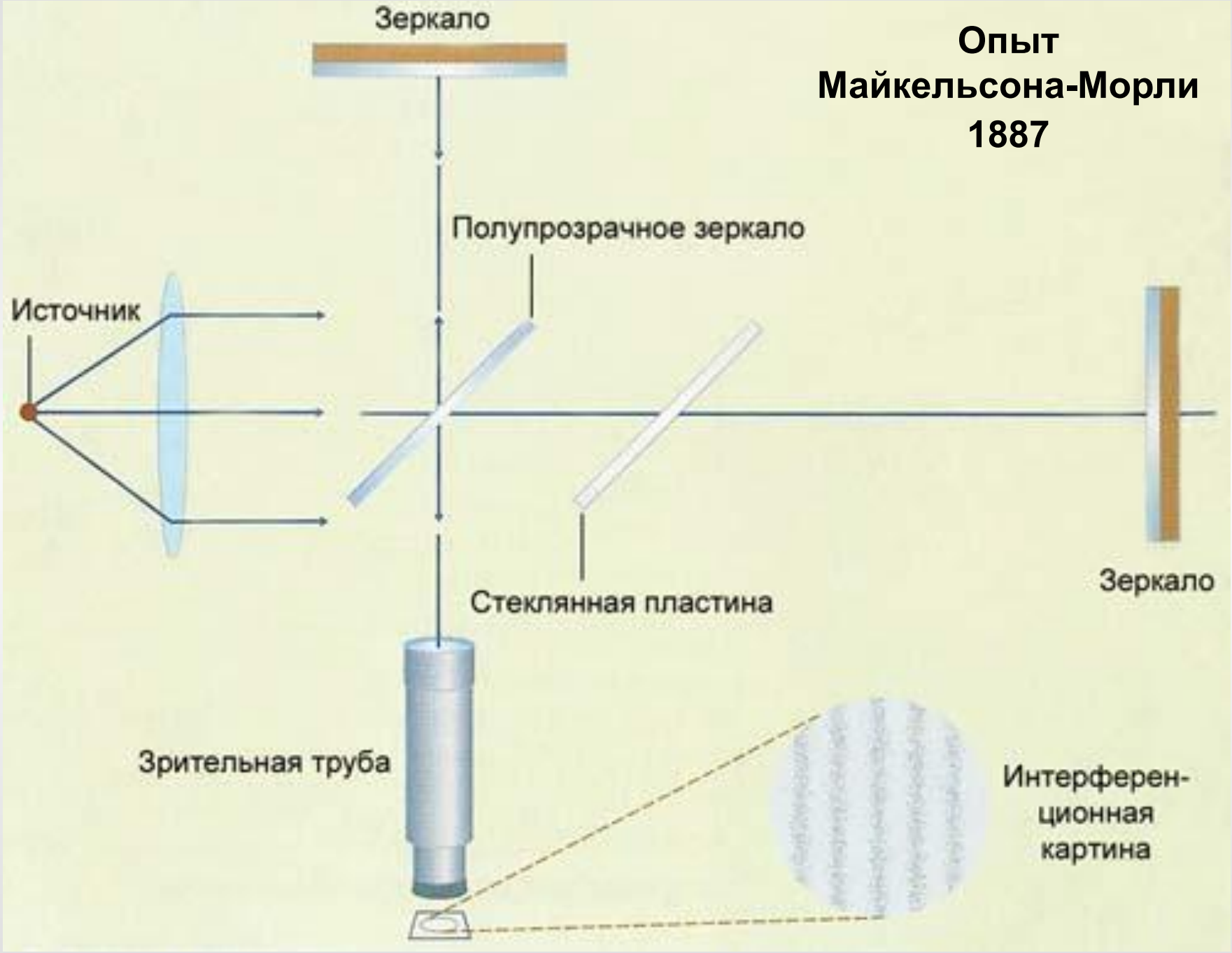
1676 Рёмер

Затмения лун Юпитера длиннее, когда Земля дальше

Скорость света **конечна**

214 300 км/с

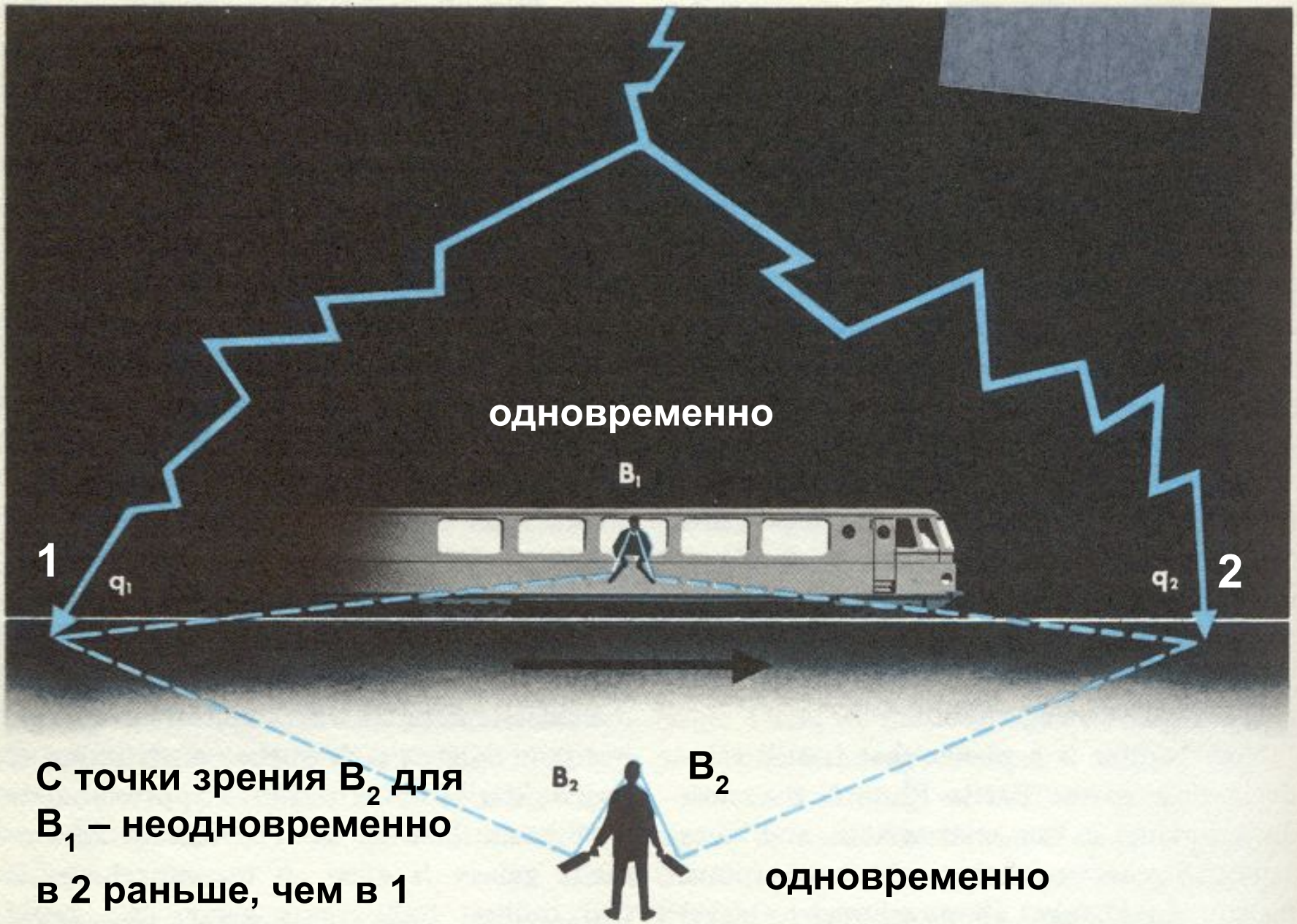
Опыт Майкельсона-Морли 1887



2. Принцип постоянства скорости света

«Каждый луч света движется в «покоящейся» системе координат с определенной скоростью с, независимо от того, испускается этот луч покоящимся или движущимся телом.

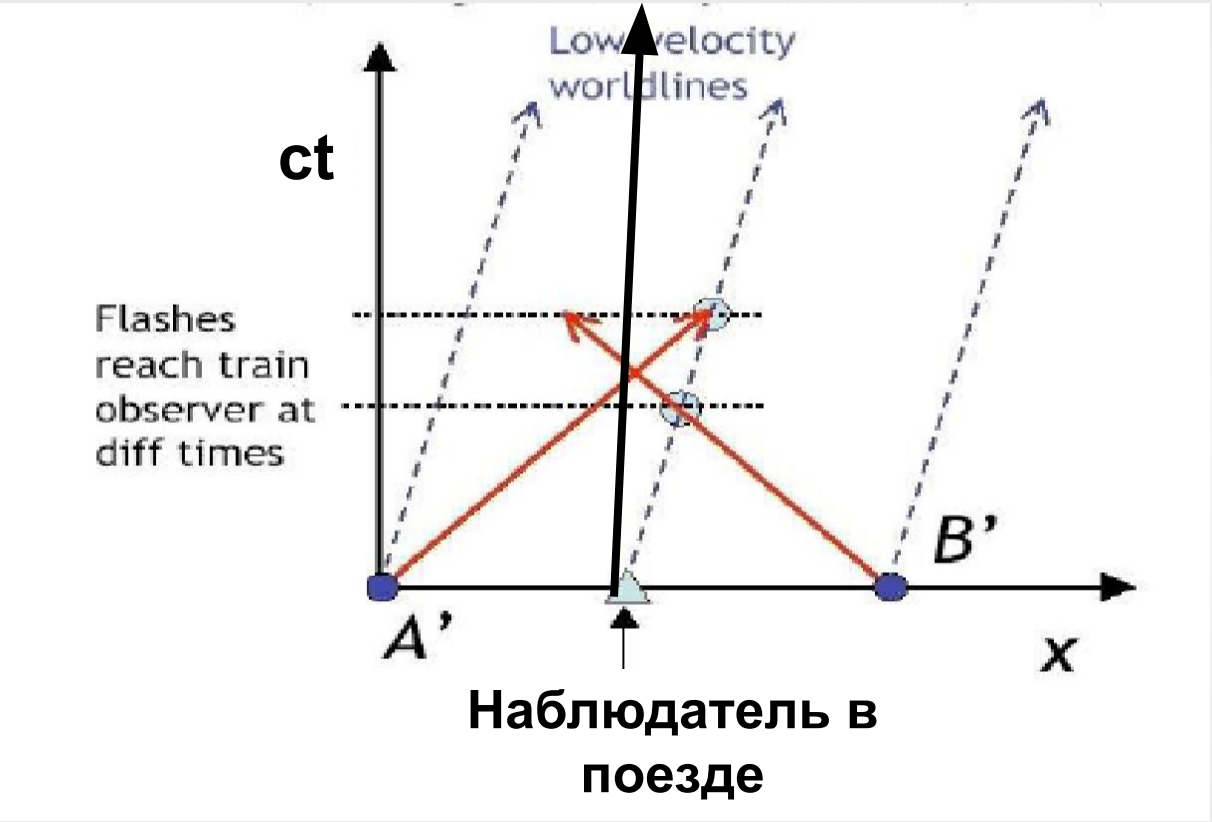
$$\text{Скорость} = \frac{\text{путь луча света}}{\text{промежуток времени}}$$

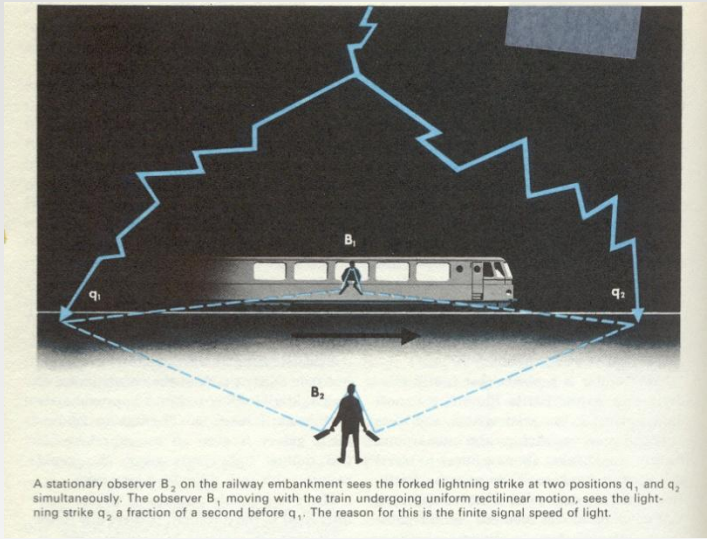


С точки зрения B_2 для B_1 – неодновременно

в 2 раньше, чем в 1

A stationary observer B_2 on the railway embankment sees the forked lightning strike at two positions q_1 and q_2 simultaneously. The observer B_1 moving with the train undergoing uniform rectilinear motion, sees the lightning strike q_2 a fraction of a second before q_1. The reason for this is the finite signal speed of light.





Мировые линии наблюдателя в поезде из его собственной системы отсчета и из системы отсчета на платформе.

Событие вместо материальной точки

Центральное понятие СТО – **событие**

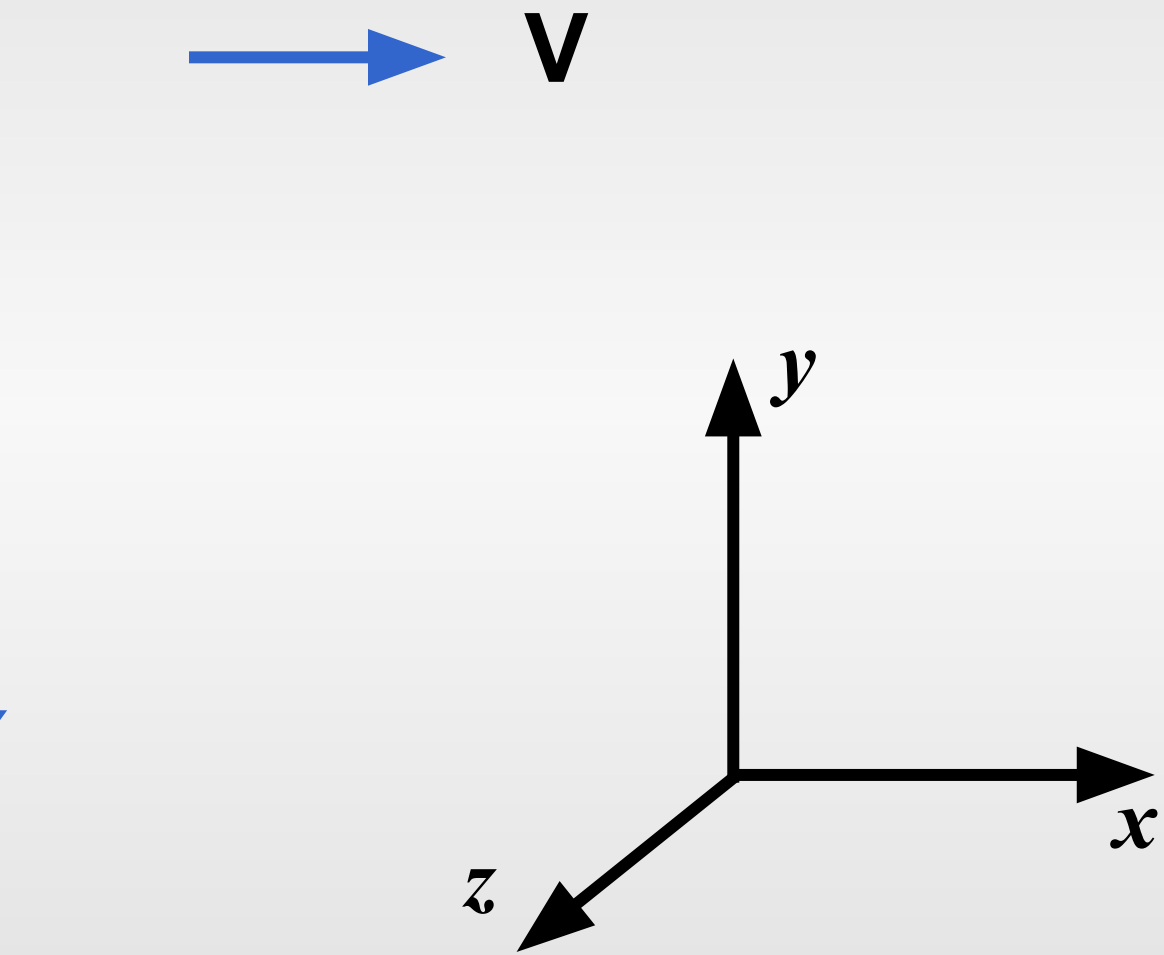
Описывается 4 координатами в каждой системе отсчета

$$P = (x, y, z, t)$$

Отказ от абсолютного времени

Мысленные эксперименты

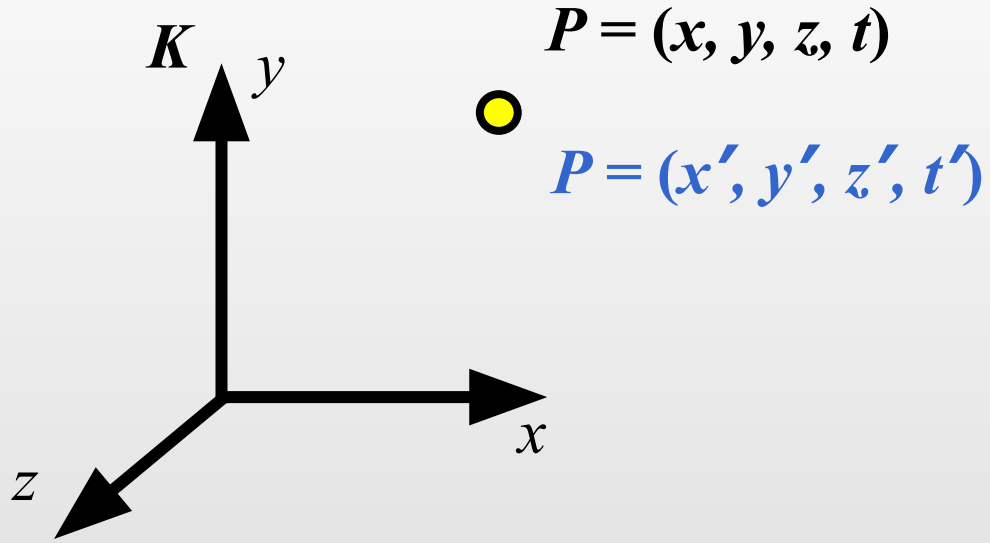
Преобразования Галилея



Преобразования Галилея

Для **события** в точке P:

в K $P = (x, y, z, t)$ в K' $P = (x', y', z', t')$



Преобразования Галилея

$$x' = x - \mathrm{v}t$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$t' = t$$

Прямое V

$$x = x' + \mathrm{v}t'$$
$$y = y'$$
$$z = z'$$
$$t = t'$$

Обратное –V

Вывод преобразований Лоренца

Должны быть линейны (следует из однородности пространства)

Введем коэффициент

$$\beta = \frac{v}{c}$$

Тогда преобразование Галилея

$$x = x' + vt' \Rightarrow x = x' + \beta \cdot ct'$$

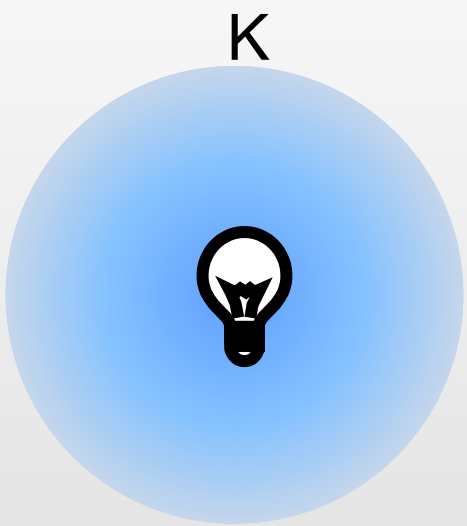
Вывод преобразований Лоренца

$$\beta = \frac{v}{c}$$

Пусть в момент 0 начала координат К и К´ совпадают.

Из точки 0 вышел луч света

В обеих системах поверхность его распространения будет сферой (постулат постоянства с).



$$x_1^2 + y_2^2 + z_2^2 = (ct)^2$$

Выразив х х´ через х´ находим линейные коэффициенты искомых преобразований

Преобразования Лоренца

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

$$y' = y$$

$$z' = z$$

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

$$\beta = \frac{v}{c}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Релятивистский коэффициент

Всегда > 1

Преобразования Лоренца

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

$$y' = y$$

$$z' = z$$

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

$$x = \frac{x' + \mathrm{v}t'}{\sqrt{1 - \mathrm{v}^2 / c^2}}$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = \frac{t' + \mathrm{v}x' / c^2}{\sqrt{1 - \mathrm{v}^2 / c^2}}$$

Преобразования Лоренца

$$\beta = \frac{v}{c}$$

$$x' = \gamma(x - \beta ct)$$

$$y' = y$$

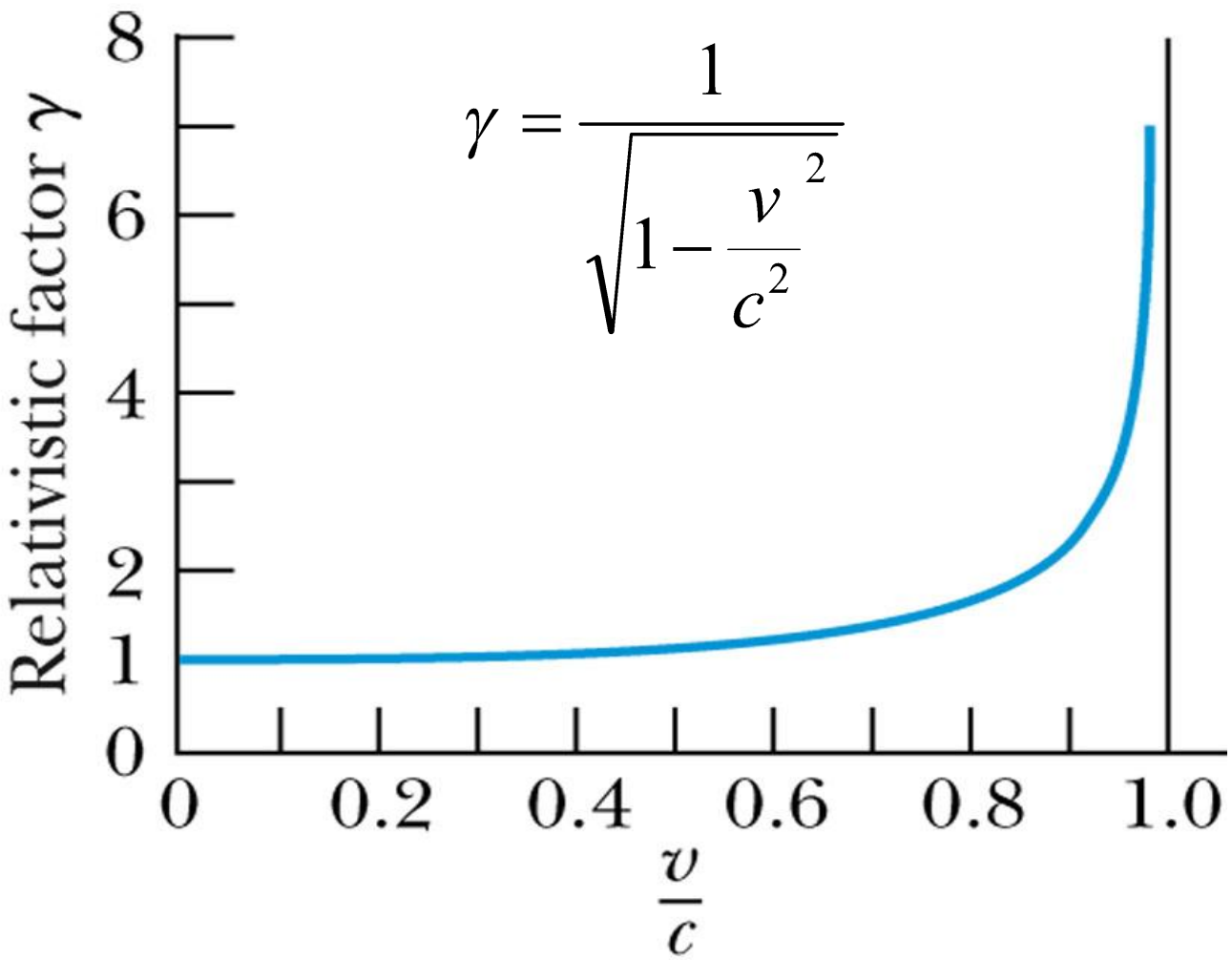
$$z' = z$$

$$t' = \gamma(t - \beta x / c)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Релятивистский коэффициент

$$\gamma \geq 1$$


$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$
Relativistic factor γ
8
6
4
2
1
0
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
$\frac{v}{c}$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \longrightarrow \mathbf{v < c}$$

Иначе γ будет мнимым, что лишено физического смысла

Таким образом, вывод о том, что любая скорость меньше скорости света – **следствие** преобразований Лоренца.

А не постулат.

Любая скорость меньше скорости света

Это ограничение верно не только для движущихся объектов, но и **для сигналов**.

Если мы принимаем **принцип причинности** – ни в одной СО следствие не может предшествовать причине.

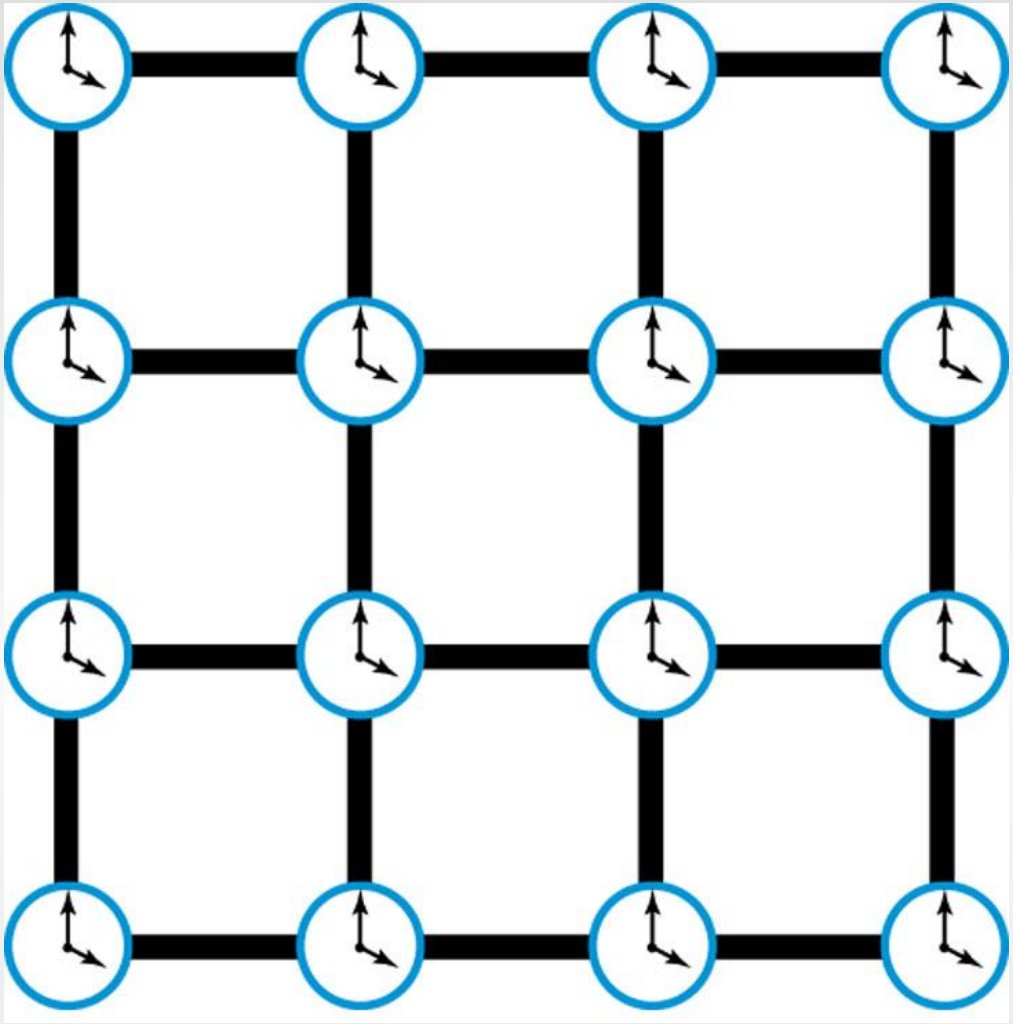
(принимается как постулат)

Следствия преобразований Лоренца

Замедление времени

В движущейся системе К´ интервал Δt ´ между событиями в неподвижной окажется **меньше**

= часы в К´ идут медленней – с точки зрения К

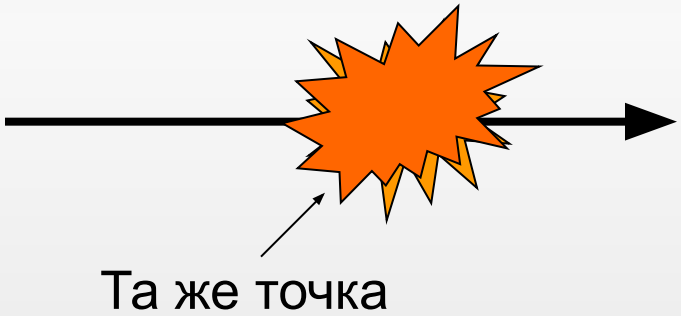


Синхронизированные часы

Время события – это то, что показывают часы, находящиеся в той же точке

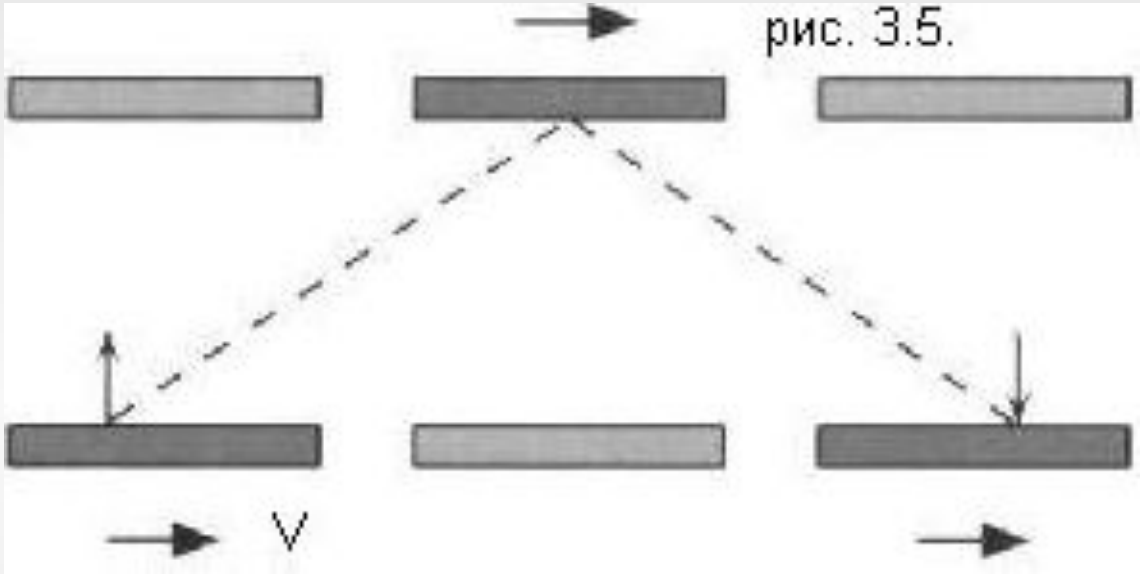
Собственное время

Время между двумя событиями в одном месте, измеренное часами, находящимися в этой же точке



τ_0 Собственное время

Световые часы установлены в К´ и К и синхронизированы в момент 0



Собственные часы К'

Часы в К', с точки зрения неподвижного наблюдателя К.

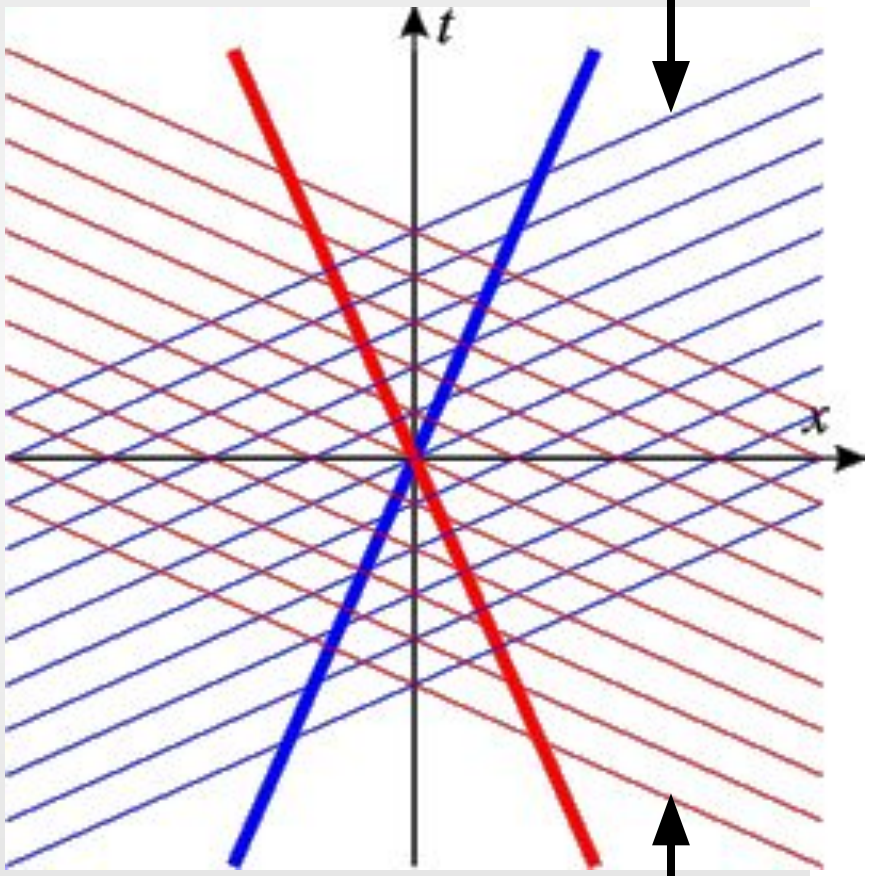
Между тиками свету в К' надо пройти бОльшее расстояние → тикать будут реже

Их показания будут меньше, чем у часов К $\tau = \gamma \tau_0$

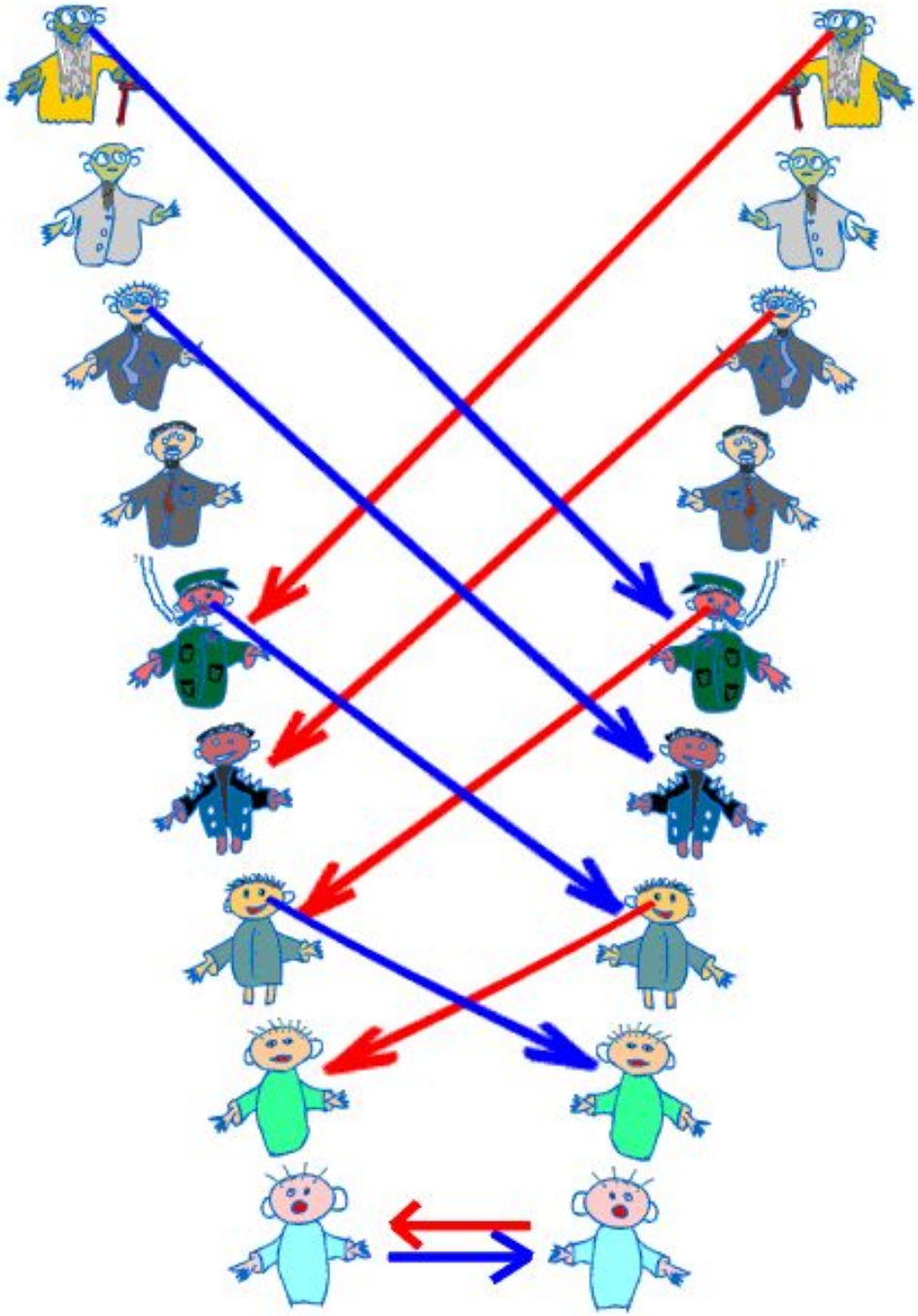
$$\tau = \gamma \tau_0$$

Для наблюдателя, летящего в К´ то же будет казаться относительно часов, неподвижно установленных в К – что они идут медленнее, чем его собственные.

Одновременное для синего



Одновременное для красного



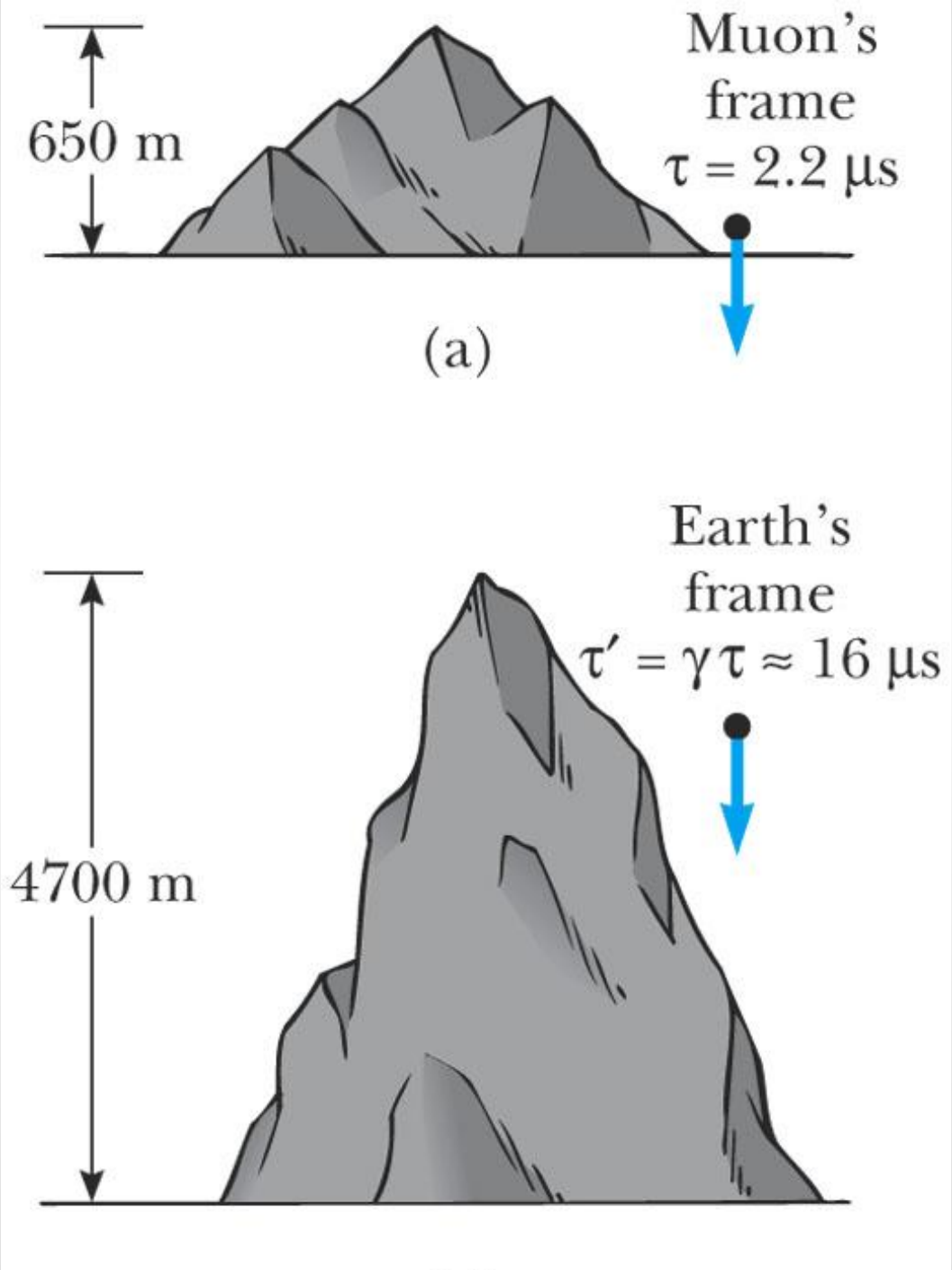
Экспериментальное подтверждение замедления времени

В 1935 году во вторичных космических лучах, рождающихся при столкновении первичных космических частиц с молекулами воздуха на высоте порядка **6 км** были обнаружены новые элементарные частицы, получившие название мю-мезоны (мюоны).

В лабораторных условиях удалось определить время их собственной жизни – порядка **10^{-6} с.**

Прожив столь малый промежуток времени, мю-мезоны распадаются на другие частицы. Продукты распада мю – мезонов, родившихся на высоте **6 км**, обнаруживаются у Земли. Но возникала проблема: как за время жизни в **10^{-6} с**, даже двигаясь **со скоростью света с = $3 \cdot 10^8$ м/с**, мю-оны могут преодолеть расстояние в 6 км. Элементарный расчет давал лишь **300 м** !

(То, что распад происходил у поверхности Земли, было обнаружено экспериментально).



СО мюона

Земля сокращается

СО Земли

Время на мюоне течет медленнее – по земным часам он живет дольше

Укорочение отрезков

Собственная длина L_0 – измеренная линейкой в системе отсчета, где отрезок неподвижен.

Как измерить его из системы, относительно которой он пролетает со скоростью V?

1. Можно **в одно и то же время** отметить на своей оси **X** точки концов летящего стержня, а затем своей линейкой измерить расстояние между этими точками .

2. Находясь **в одной точке**, засечь интервал времени по своим часам, за который пролетает стержень. Затем этот интервал времени умножить на скорость стержня v.

Укорочение отрезков

Собственная длина L_0 – измеренная линейкой в системе отсчета, где отрезок неподвижен.

$$L' = L_0 / \gamma = L_0 \sqrt{1 - \mathrm{v}^2 / c^2}$$

Тот же отрезок, измеренный из движущейся относительно него со скоростью V системы отсчета.

Сложение скоростей

K′ движется относительно K со скоростью **V**, а в K′ со скоростью **u'** движется тело. Найти его **u** в K.

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{v u'_x}{c^2}}, \qquad u_y = \frac{\sqrt{1 - v^2/c^2}\, u'_y}{1 + \frac{v u'_x}{c^2}},$$

$$u_z = \frac{\sqrt{1 - v^2/c^2}\, u'_z}{1 + \frac{v u'_x}{c^2}}.$$

Для случая, когда **u‘** параллельна оси X

$$u = \frac{v + u'}{1 + \frac{vu'}{c^2}}$$

Следствие: при сложении <u>любых</u> двух скоростей **V** и **u'**, меньших с, всегда получается суммарная скорость **u,** меньшая **c.**

Сложение скоростей **неаддитивно**

Подставим

V = c – χ **u' = c – λ**

$$u = c\frac{2c - \varkappa - \lambda}{2c - \varkappa - \lambda + \frac{\varkappa\lambda}{c}} < c$$

Если обе скорости **V** и **u'** равны ***c***, то суммарная тоже равна **c**

Графическое изображение преобразований – мир Минковского

4-мерное
псевдоевклидово
пространство-время

Герман Минковский
1864 — 1909

$$ds^2 = \Sigma\, g_{ij}\, dx_i\, dx_j$$

Метрический тензор пространства

n-мерное евклидово

$$g_{ij} = \delta_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

4-мерное неевклидово Минковского

$$g = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Интервал между событиями

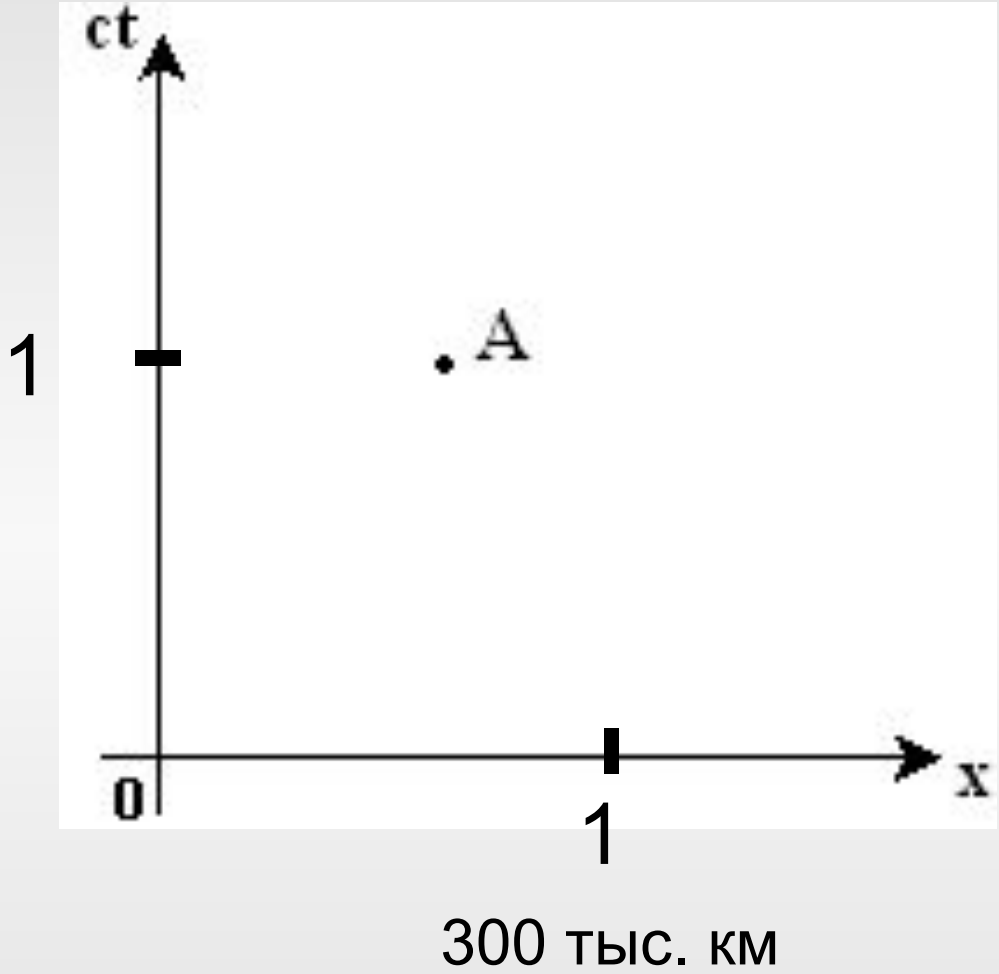
$$ds = \sqrt{g_{ij}dx^i dx^j} = \sqrt{c^2(dt)^2 - (dx)^2 - (dy)^2 - (dz)^2}$$

$$S^2 = C^2T^2 - R^2$$

Инвариантен относительно преобразований Лоренца

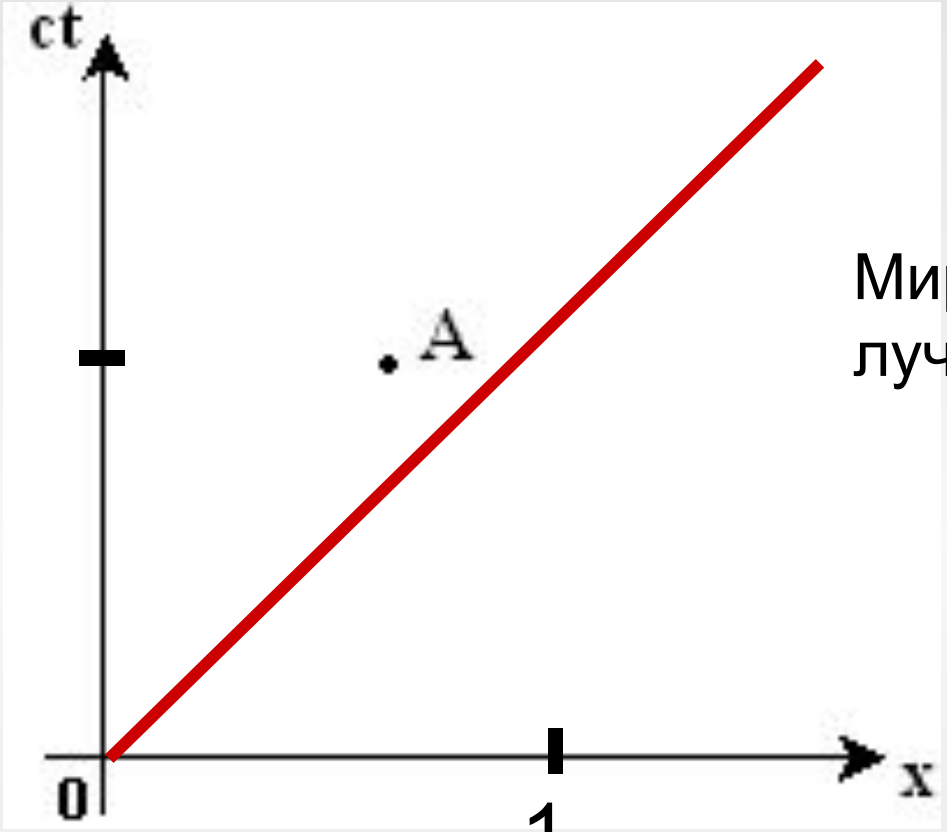
1 сек =

300 тыс. км
времени



1 сек =

300 тыс. км времени



1

1

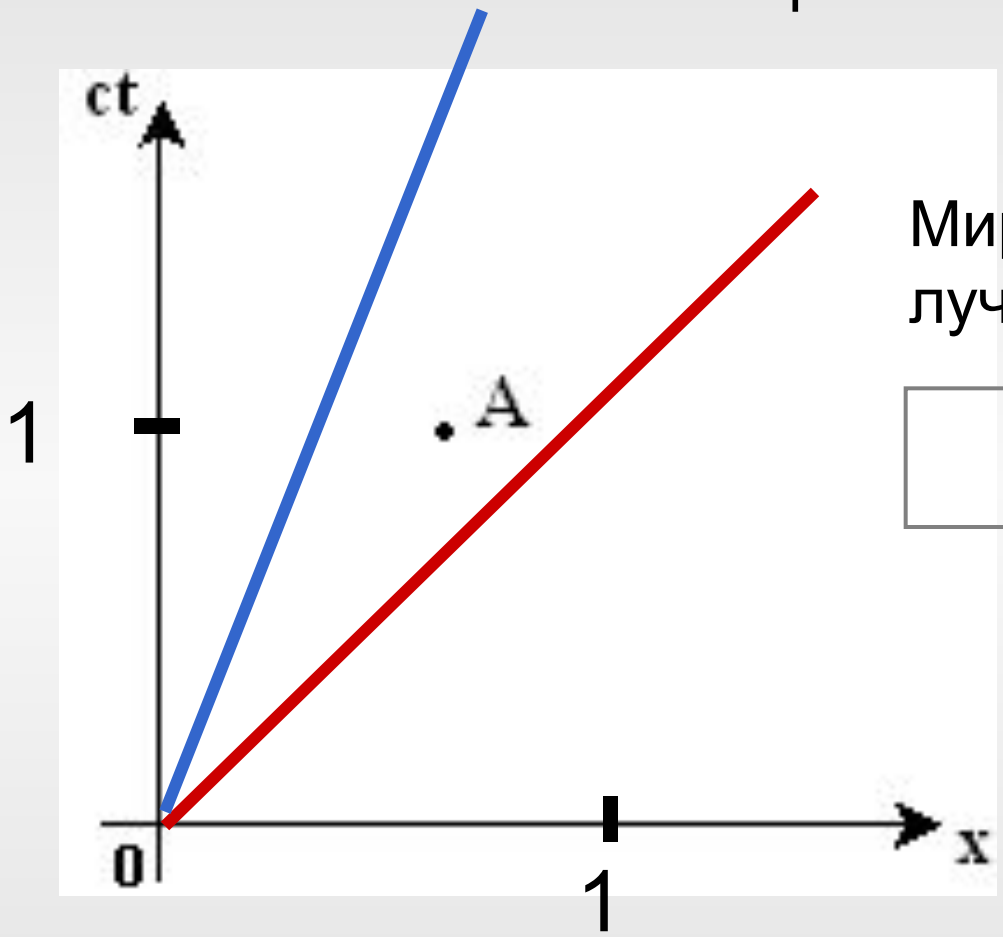
300 тыс. км

Мировая линия луча света

k ct = x

$$k\,ct = x$$

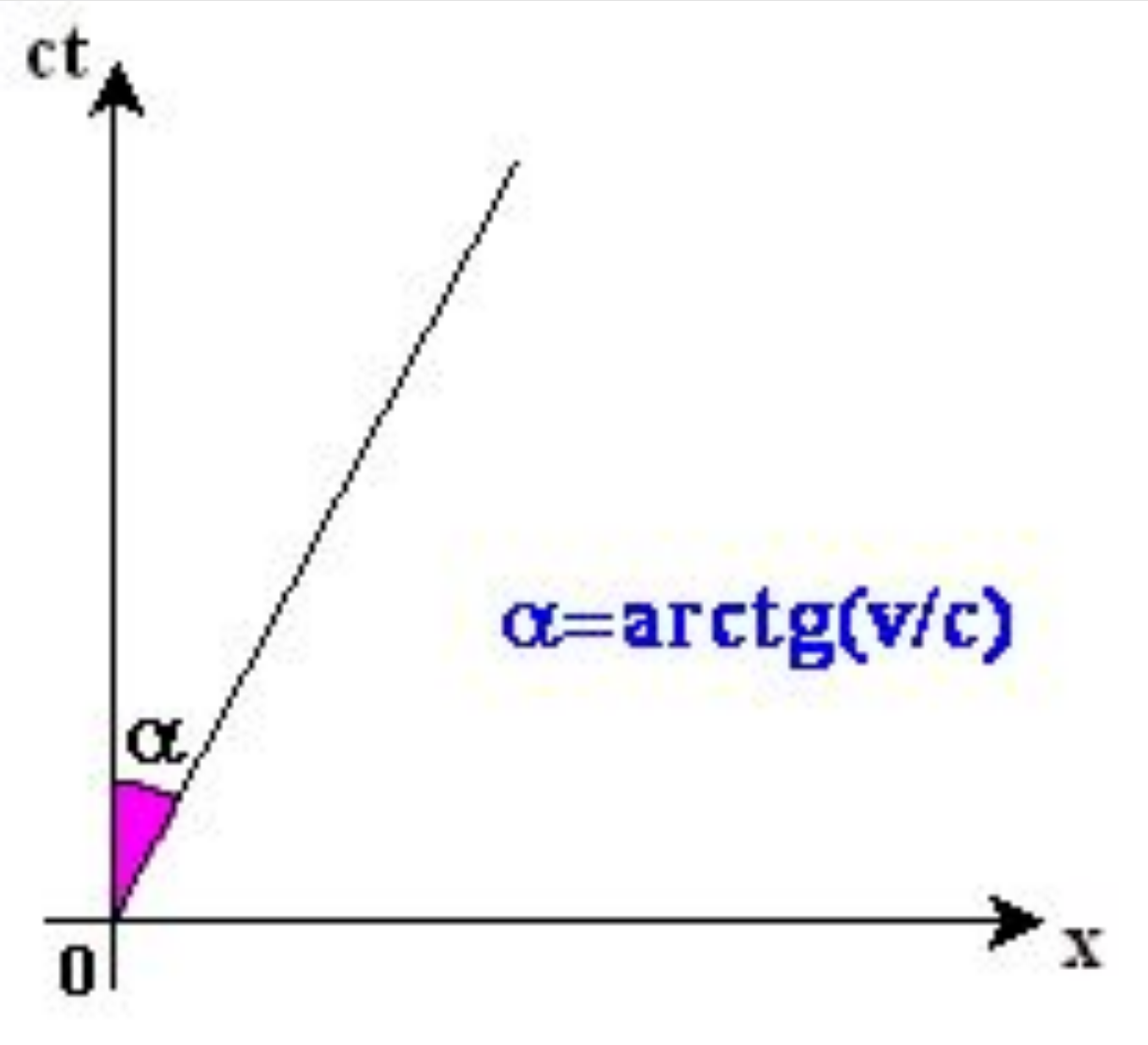
Мировая линия объекта движущегося со скоростью V



Мировая линия луча света

$$\boxed{k = 1}$$

подставляя $x = vt$ получим $\boxed{k = v / c}$


ct
α
0
x
α=arctg(v/c)

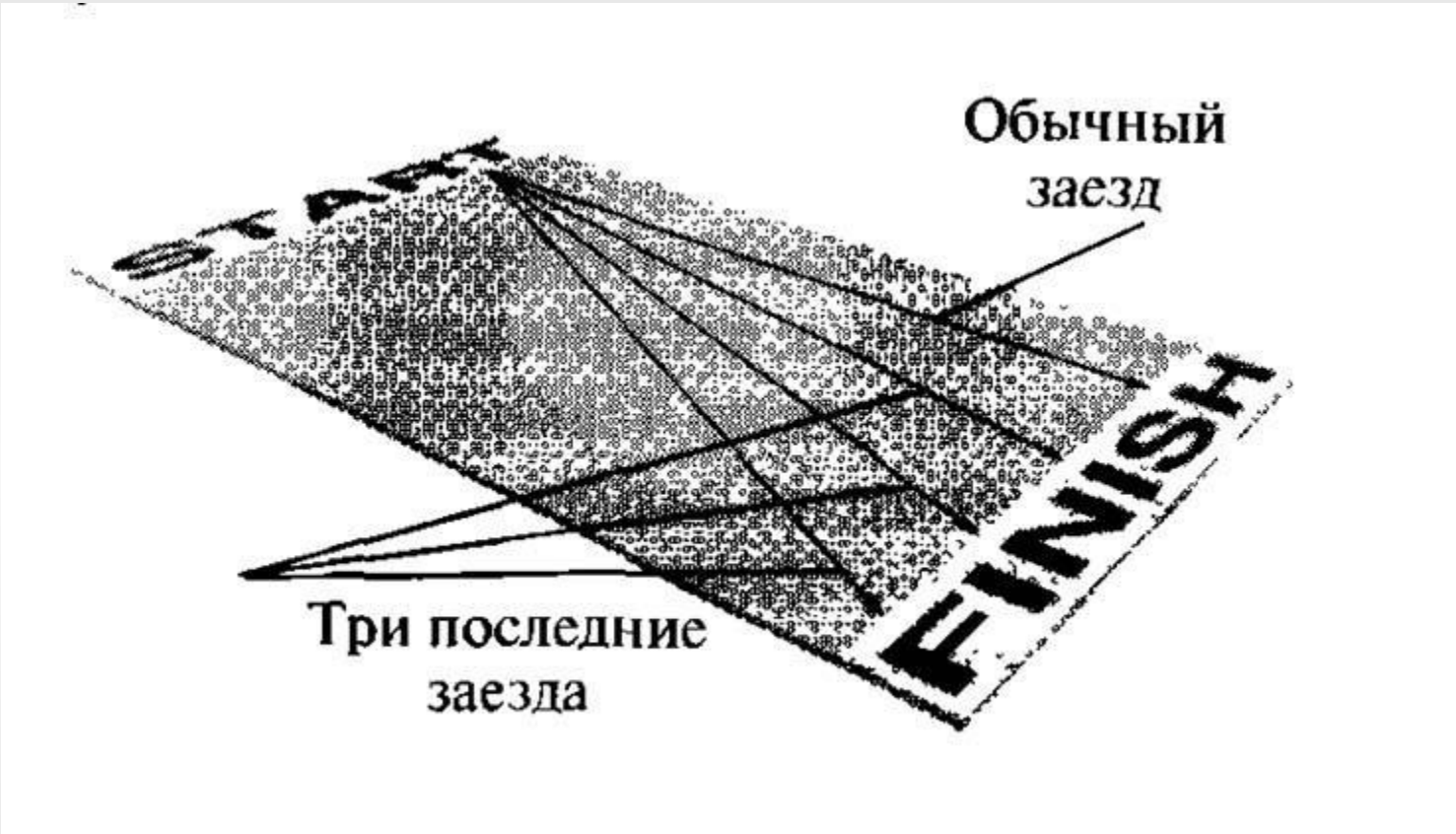
Для событий, разделенных лучом света, интервал равен 0

$$s^2 = c^2t^2 - l^2 = c^2t^2 - (ct)^2 = 0$$

Инвариантность интервала является математическим выражением постоянства скорости света

http://physics-vargin.net/books/popul/vselennaya/greene.rar

Гоночный автомобиль с постоянной скоростью 160 км/час



Аналогия, приводимая Грином

Точно та же идея — **разделение движения между различными измерениями** — лежит в основе всех замечательных физических проявлений специальной теории относительности, если только мы осознаем, что движение тела распределяется не только между пространственными измерениями, но что ***временное*** измерение также может принимать участие в этом разделении.

На самом деле, в большинстве случаев ***большая часть*** перемещения объекта происходит как раз во времени, а не в пространстве.

Можем ли мы говорить о ***скорости движения объекта во времени*** подобно тому, как мы говорим о скорости его движения в пространстве?

Да, можем.

Ключ к разгадке: когда тело движется в пространстве относительно нас, его часы идут медленнее по сравнению с нашими. Иными словами, ***скорость его движения во времени замедляется***.

Новая идея состоит в следующем.

Эйнштейн провозгласил, что ***все объекты* во Вселенной *всегда* движутся в пространстве-времени с одной постоянной скоростью — скоростью света**.

отсюда немедленно следует факт существования **ограничения** на скорость тела в пространстве:

максимально возможная скорость движения в пространстве будет достигнута, если **все движение тела во времени перейдет в движение в пространстве**

Поэтому фотоны никогда не стареют. Фотон, который был излучен во время Большого взрыва, имеет тот же самый возраст, который он имел тогда.

Ход времени останавливается по достижении скорости света.

Физический смысл значения интервала для двух событий

$$c^2t^2 > R^2 \quad \text{и} \quad s^2 > 0$$

Времени-подобные

$$c^2t^2 < R^2 \quad \text{и} \quad s^2 < 0$$

Пространственно-подобные

$$c^2t^2 = R^2 \quad \text{и} \quad s^2 = 0$$

Свето-подобные

Времени-подобные

$$c^2t^2 > R^2 \quad \text{и} \quad s^2 > 0$$

Существует СО, в которой события А и В **одноместны** (в одной точке пространства)

В этой СО интервал между ними равен ct – промежутку **времени** между событиями

События, происходящие с **одним и тем же объектом**, а также события, связанные **причинно-следственной связью**

Пространственно-подобные

$$c^2t^2 < R^2 \quad \text{и} \quad s^2 < 0$$

Существует СО, в которой события А и В **одновременны** (но в разных точках пр-ва)

В этой СО $s^2 = -\Delta R^2$

где ΔR – расстояние между точками, где произошли события, измеренное в масштабе этой системы.

Эти события **никак не связаны, независимы.**

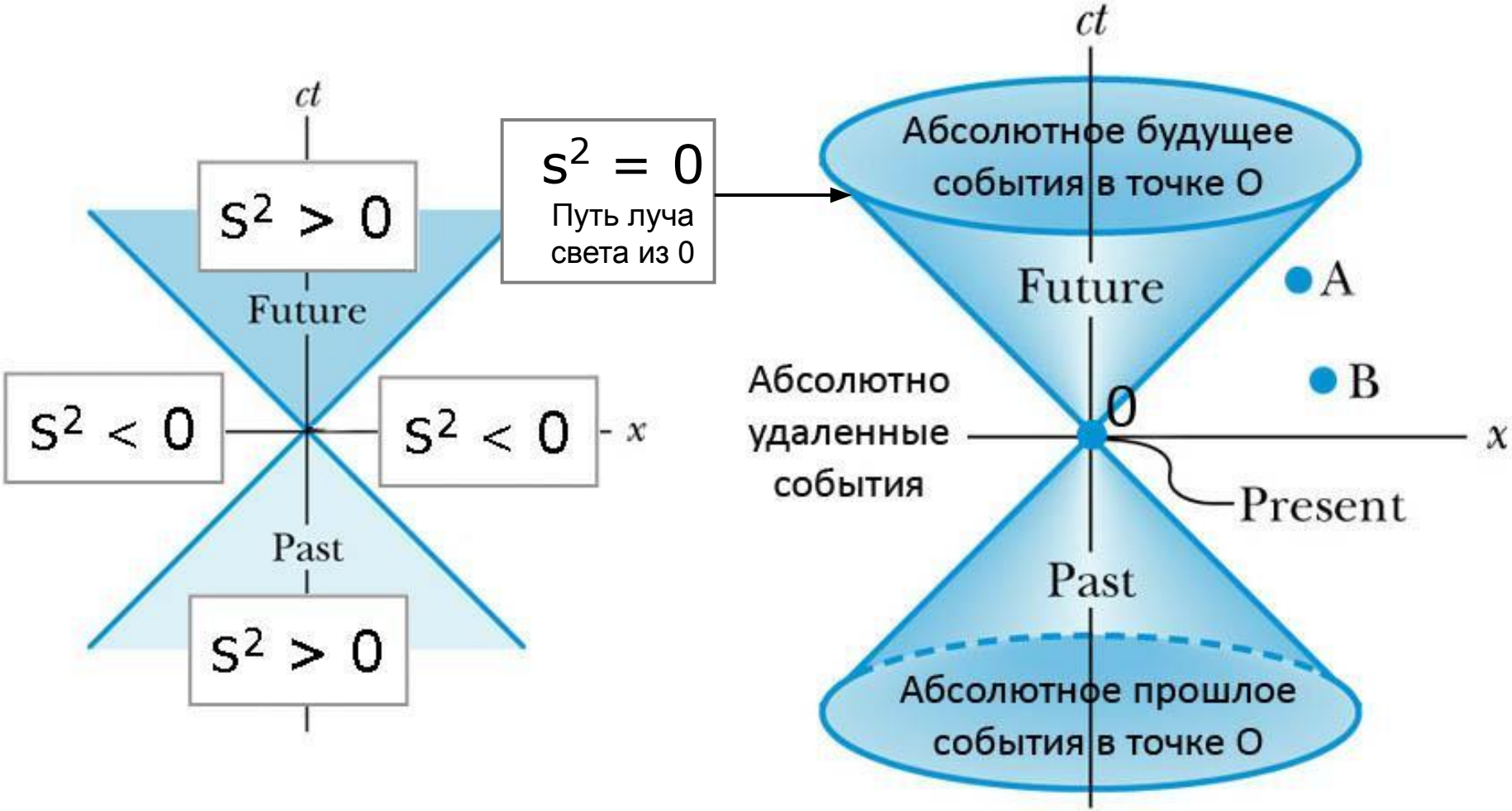
Луч света от одного не успевает дойти до другого.

Свето-подобные

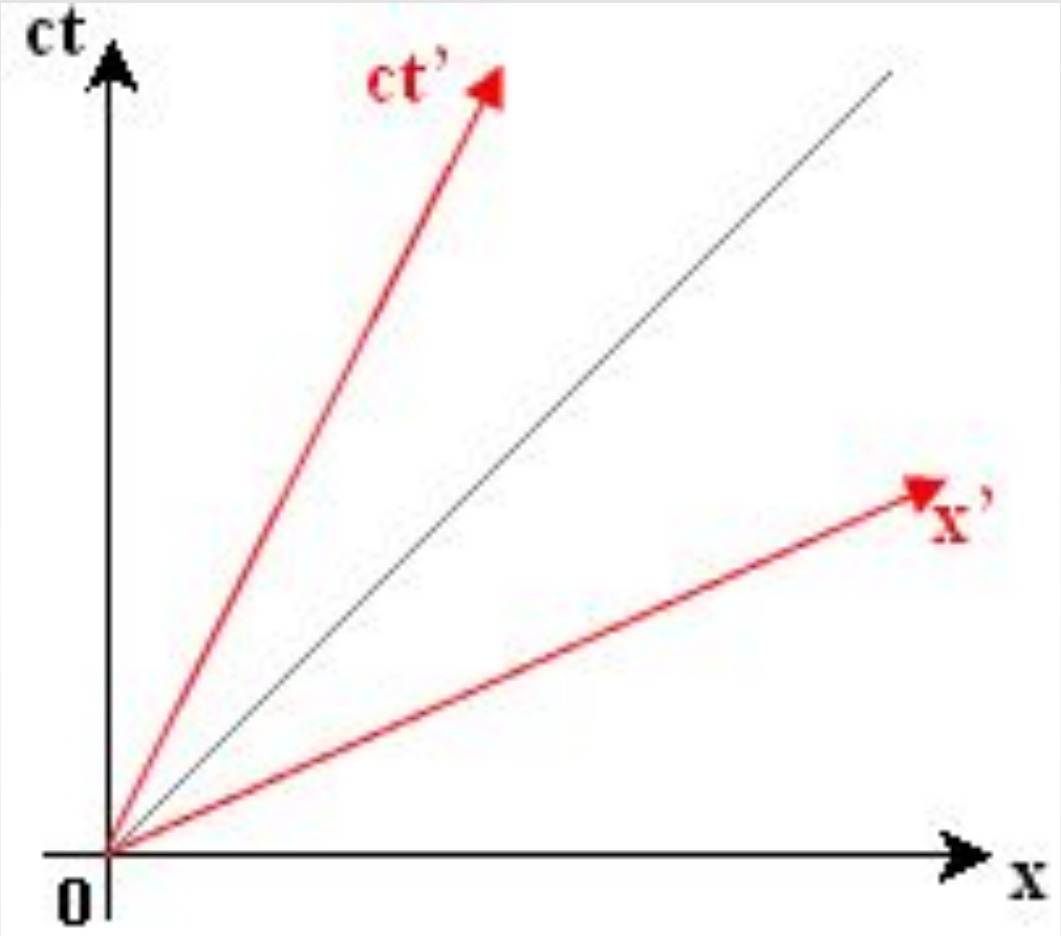
$$c^2t^2 = R^2 \quad \text{и} \quad s^2 = 0$$

Все события, лежащие на пути **луча света**.

Световые конусы для события в точке 0

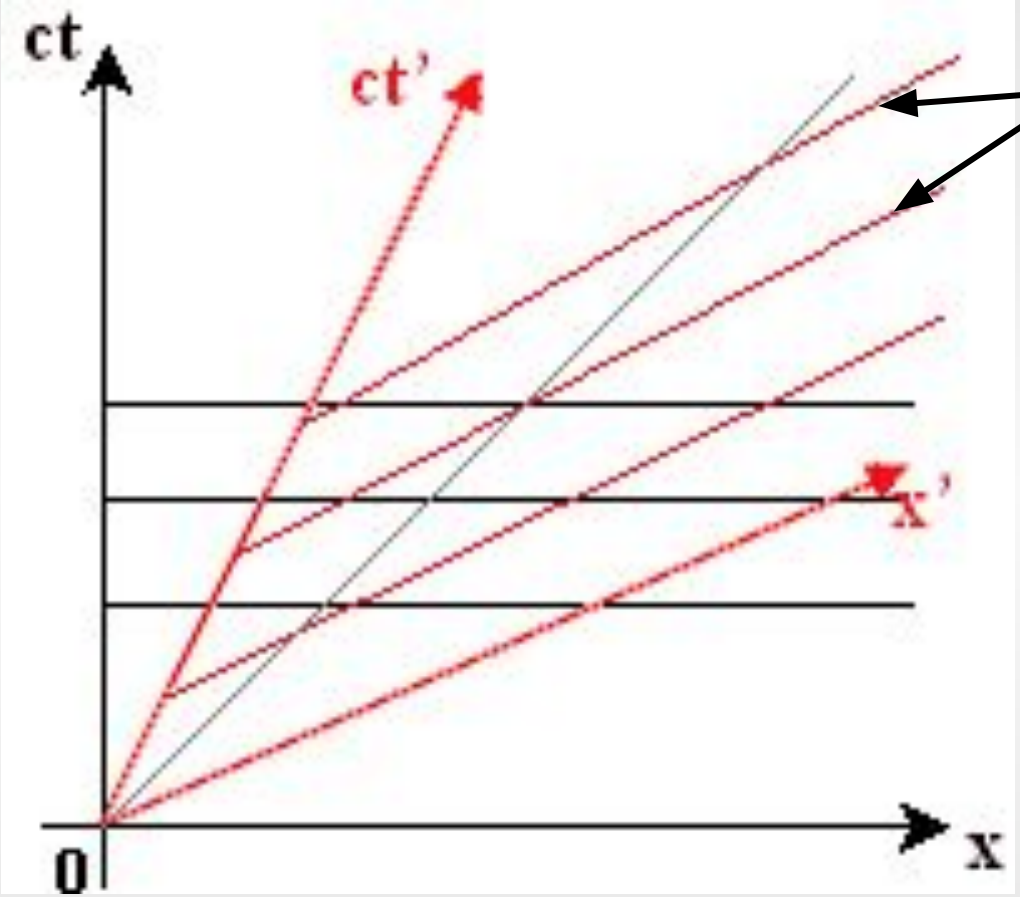


Графическое изображение разных систем отсчета в 4-мерном пространстве-времени Минковского



Система отсчета К' движущаяся относительно выбранной со скоростью V вдоль оси X

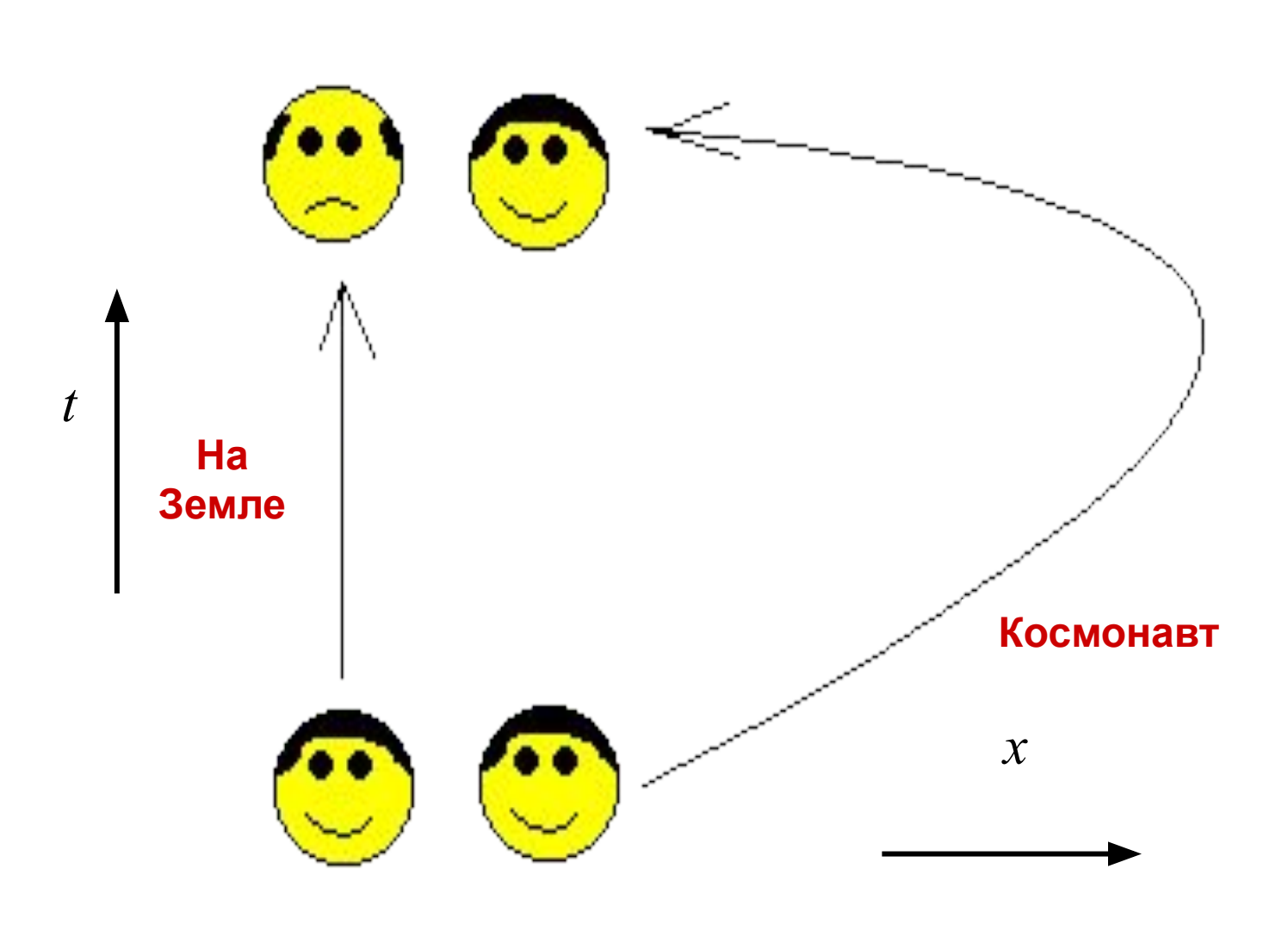
Относительность одновременности



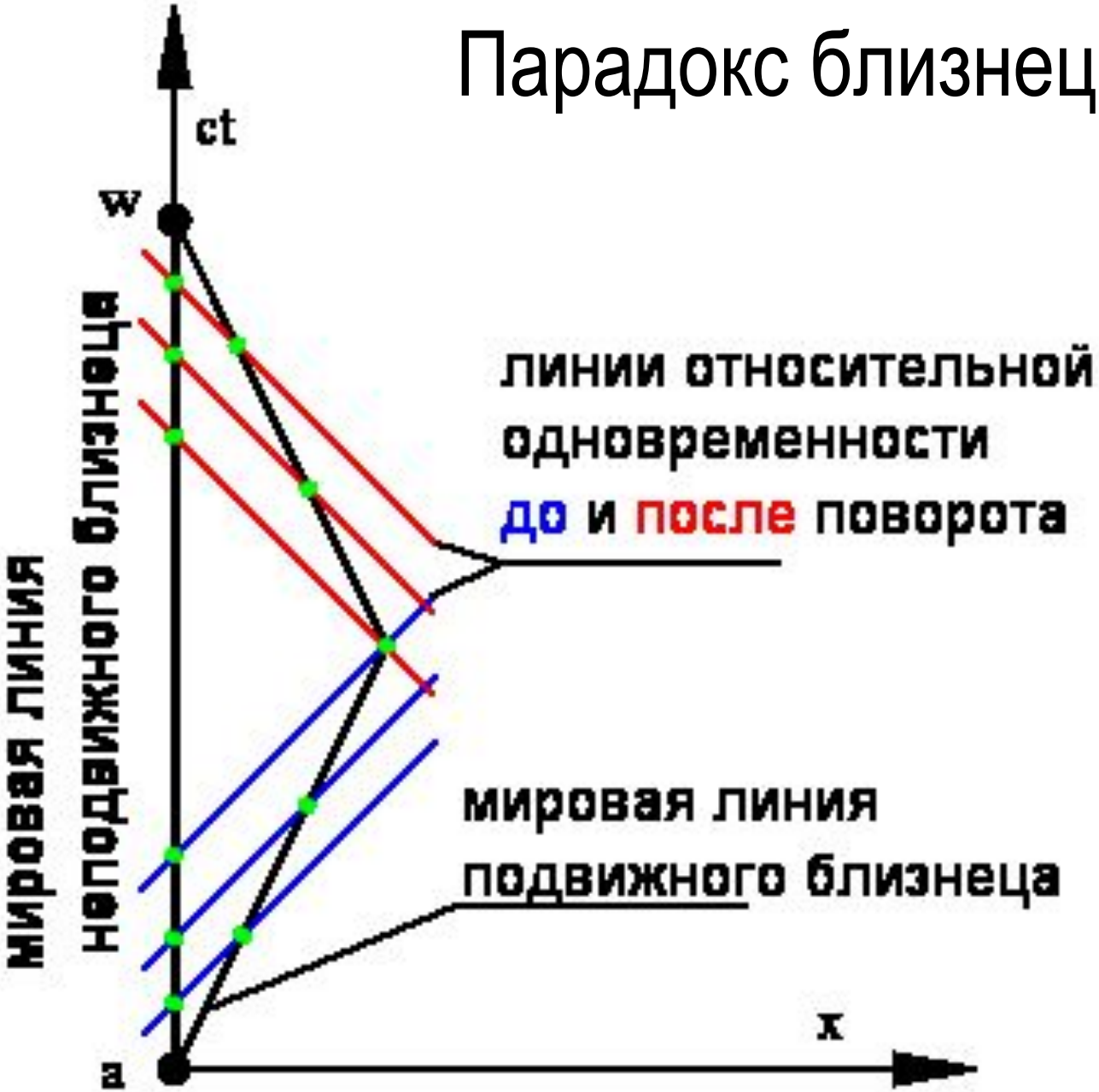
Линии одновременности системы отсчета К´

Линии одновременности в **данной СО параллельны оси x ЭТОЙ СИСТЕМЫ**

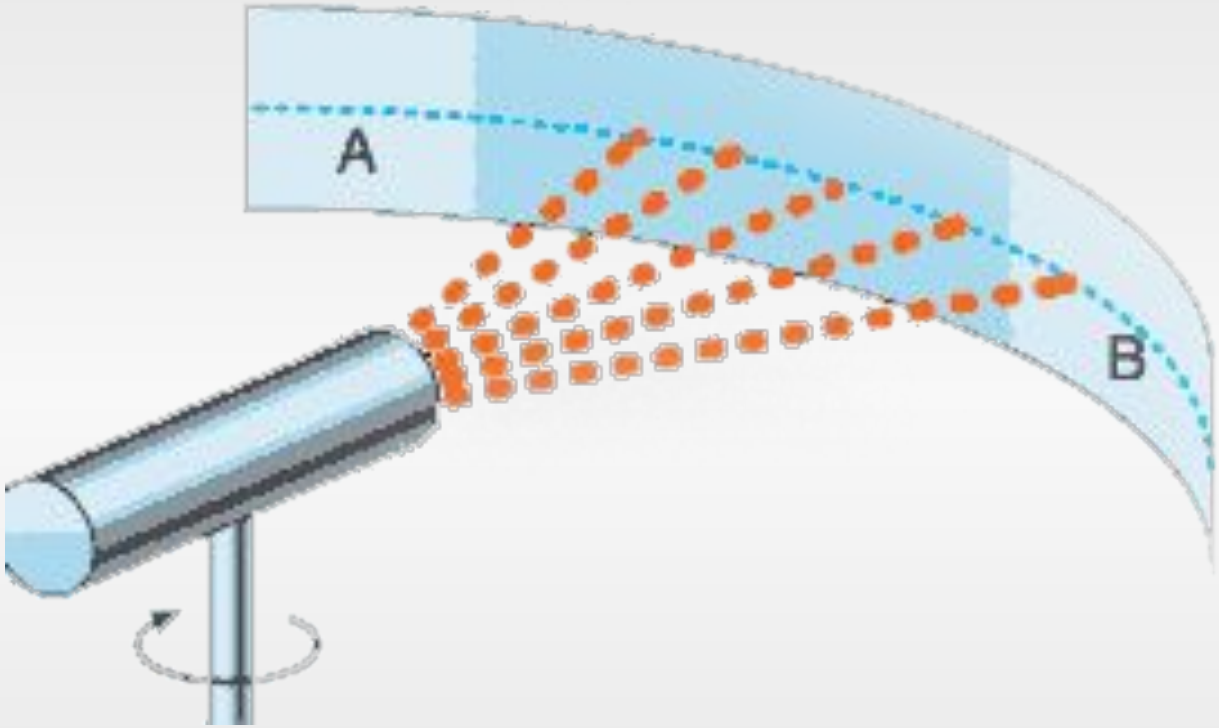
Парадокс близнецов



Парадокс близнецов

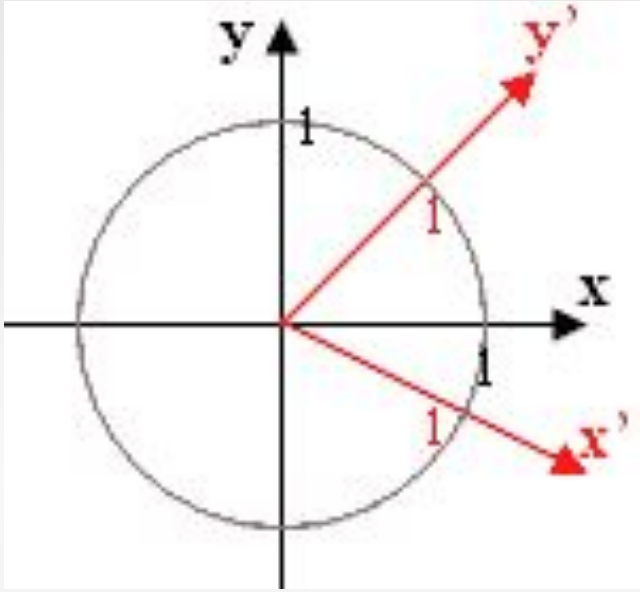


Парадокс зайчика от фонарика



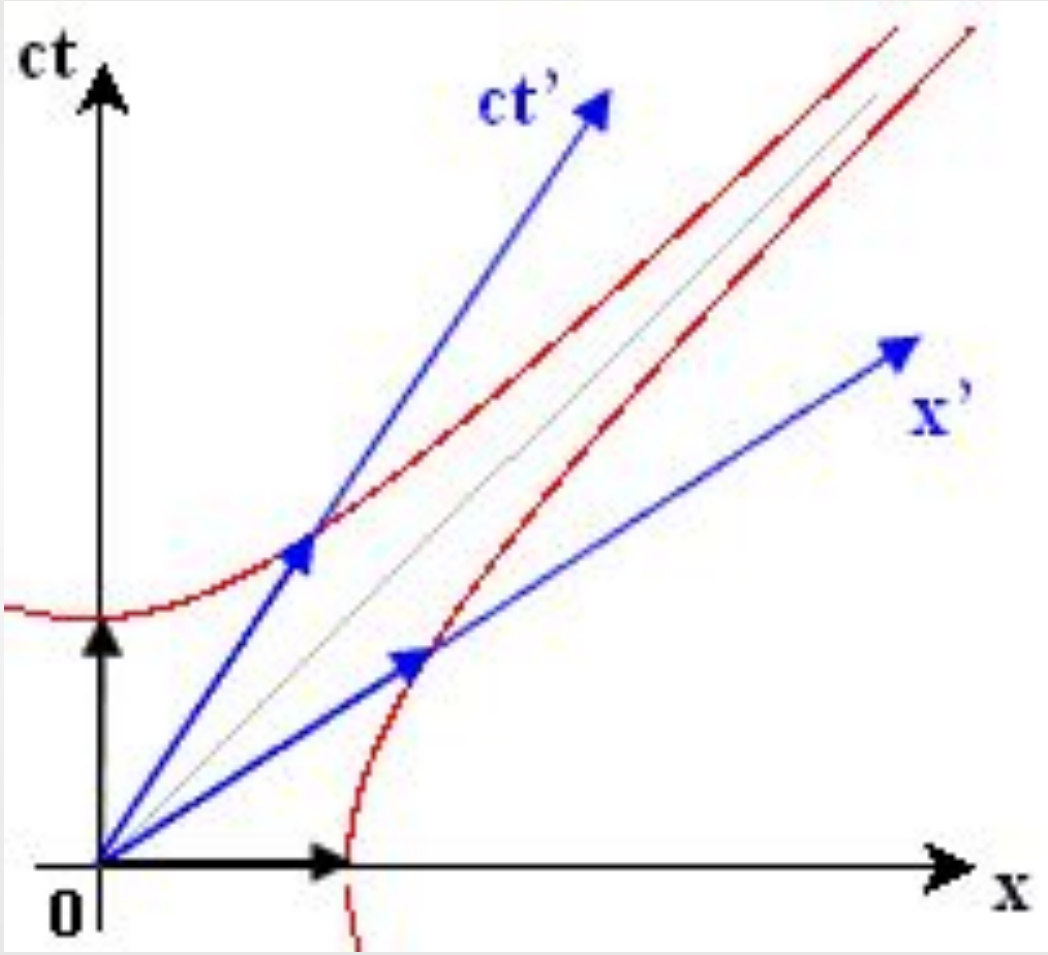
На бесконечно удаленном экране зайчик движется со сверхсветовой скоростью

Кривая, отсекающая единичные длины на осях координат



Евклидово пространство

Окружность



Пространство Минковского

Гипербола

Источники

Часть слайдов лекции взята (с изменениями) из презентаций курса **Physics 2213b Modern Physics проф. Rick Trebino** с сайта http://www.physics.gatech.edu/gcuo/lectures/

Лекции MP08 – MP10 Special relativity

Авторские права

Вы скачали данную презентацию с сайта **Biologii.Net**, согласившись с тем, что

Вы можете свободно

- Использовать данную презентацию в образовательных целях с сохранением авторства.
- Использовать рисунки и отдельные слайды в своих презентациях и на сайтах со ссылкой на данный сайт или автора.

Вы НЕ имеете права

- Копировать, распространять или использовать ее другим способом для извлечения коммерческой выгоды.
- Выкладывать на интернет-сайтах для скачивания.
- Использовать слайды, текст и авторские рисунки без ссылок, выдавая их за свои.

Если вы не согласны с этими условиями, удалите презентацию с вашего компьютера.

© М.А. Волошина 2009
http://http://biologii.net