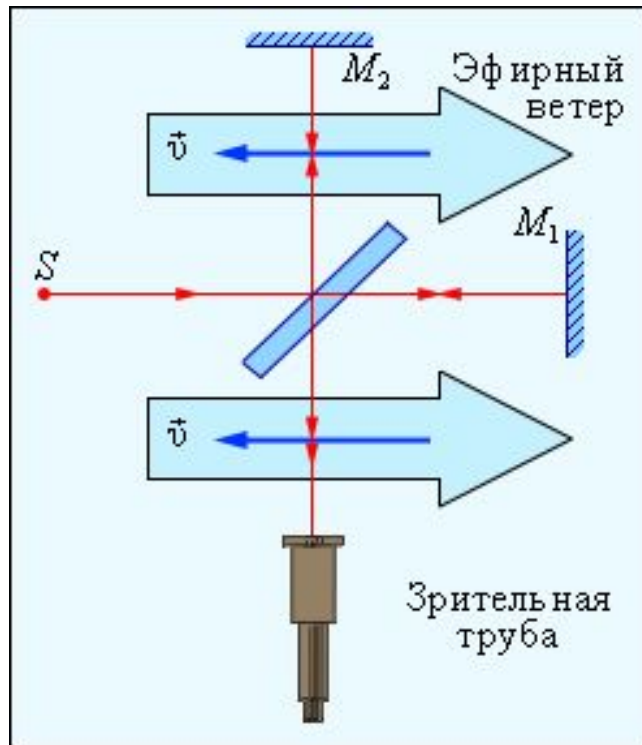


# Специальная теория относительности (СТО)

- 1. Противоречия
- 2. Опыт Майкельсона–Морли
- 3. Постулаты Эйнштейна
- 4. Преобразования Лоренца
- 5. Относительность интервала времени
- 6. Относительность расстояний
- 7. Элементы релятивистской динамики

- При переходе из одной инерциальной системы в другую, в соответствие с преобразованиями Галилея скорость света должна изменяться, но в соответствии с теорией Максвелла этого не происходит.
- Уравнения, описывающие распространение электромагнитных волн, **НЕ** инвариантны относительно преобразований Галилея

## Опыт Майкельсона–Морли



В этом опыте одно из плеч интерферометра Майкельсона устанавливалось параллельно направлению орбитальной скорости Земли ( $v = 30$  км/с).

Опыт Майкельсона–Морли, неоднократно повторенный впоследствии со все более возрастающей точностью, дал отрицательный результат. Анализ результатов опыта Майкельсона–Морли и ряда других экспериментов позволил сделать вывод о том, что представления об эфире как среде, в которой распространяются световые волны, ошибочно.

Для света не существует избранной (абсолютной) системы отсчета.

*Движение Земли по орбите не оказывает влияния на оптические явления на Земле*

## Два постулата Эйнштейна

В основе специальной теории относительности лежат **два принципа или постулата**, сформулированные Эйнштейном в 1905 г.

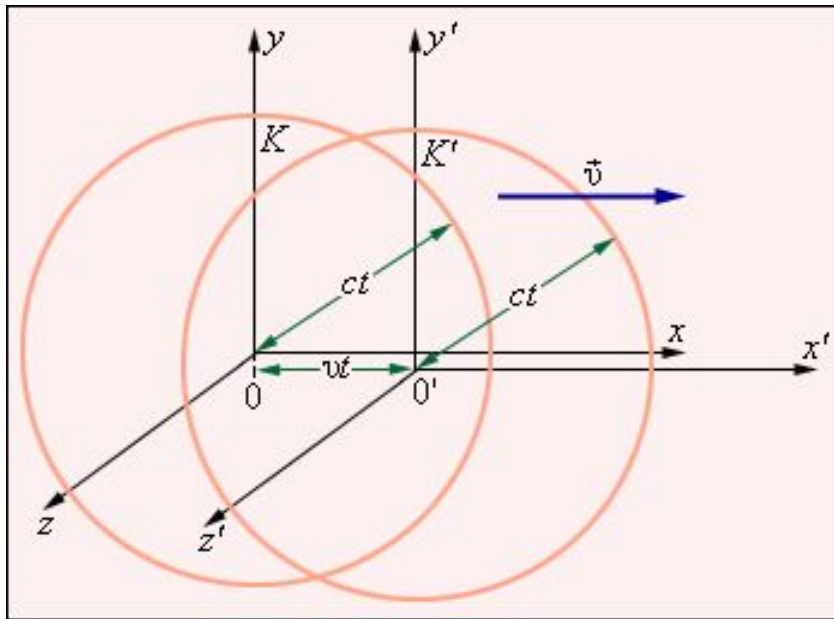
**Принцип относительности: все законы природы инвариантны по отношению к переходу от одной инерциальной системы отсчета к другой.**

Это означает, что во всех инерциальных системах физические законы (не только механические) имеют одинаковую форму. Таким образом, принцип относительности классической механики обобщается на все процессы природы, в том числе и на электромагнитные.

**Принцип постоянства скорости света: скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчета.**

Скорость света в СТО занимает особое положение. Это **предельная скорость передачи взаимодействий и сигналов** из одной точки пространства в другую.

## Постулаты СТО находятся в противоречии с классическими представлениями



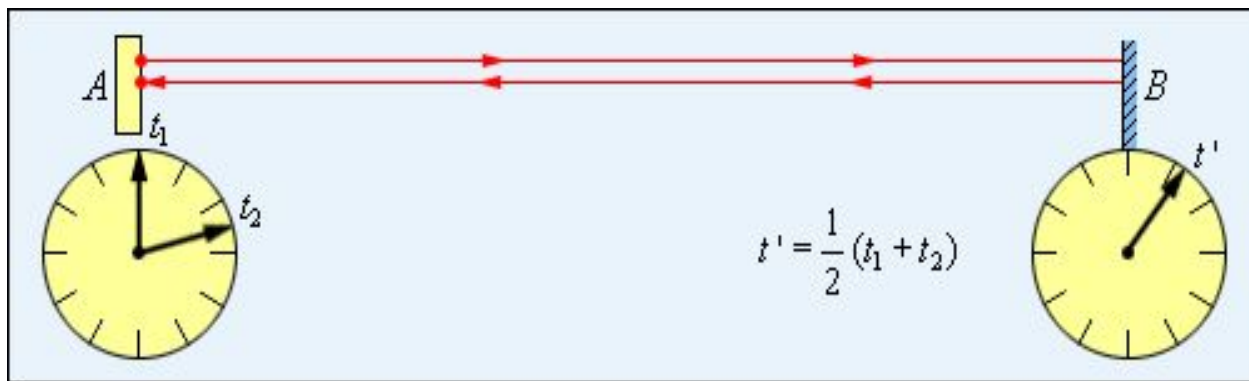
В момент времени  $t = 0$ , когда координатные оси двух инерциальных систем  $K$  и  $K'$  совпадают, в общем начале координат произошла кратковременная вспышка света.

За время  $t$  системы сместятся относительно друг друга на расстояние  $vt$ , а сферический волновой фронт в каждой системе будет иметь радиус  $ct$ , так как системы равноправны и в каждой из них скорость света равна  $c$ .

Противоречие не между двумя принципами СТО, а в допущении, что положение фронтов сферических волн для обеих систем относится к **одному и тому же моменту времени**

Существование единого мирового времени, **не зависящего от системы отсчета** эквивалентно допущению о возможности синхронизации часов с помощью сигнала, **распространяющегося с бесконечно большой скоростью.**

Эйнштейновское определение процедуры синхронизации часов основано на **независимости скорости света** в пустоте от направления распространения



**Часы в А и В идут синхронно, если**  
 **$t' = (t_1 + t_2) / 2.$**

# Относительность интервала времени

Если, в разных точках выбранной системы отсчета можно расположить синхронизованные часы, то можно дать определение понятия одновременности событий, происходящих в пространственно-разобщенных точках: эти **события одновременны, если синхронизованные часы показывают одинаковое время**

# Преобразования Лоренца

## Формулы преобразования координат и времени

Они были предложены в 1904 году еще до появления СТО, как преобразования, относительно которых *инвариантны уравнения электродинамики*

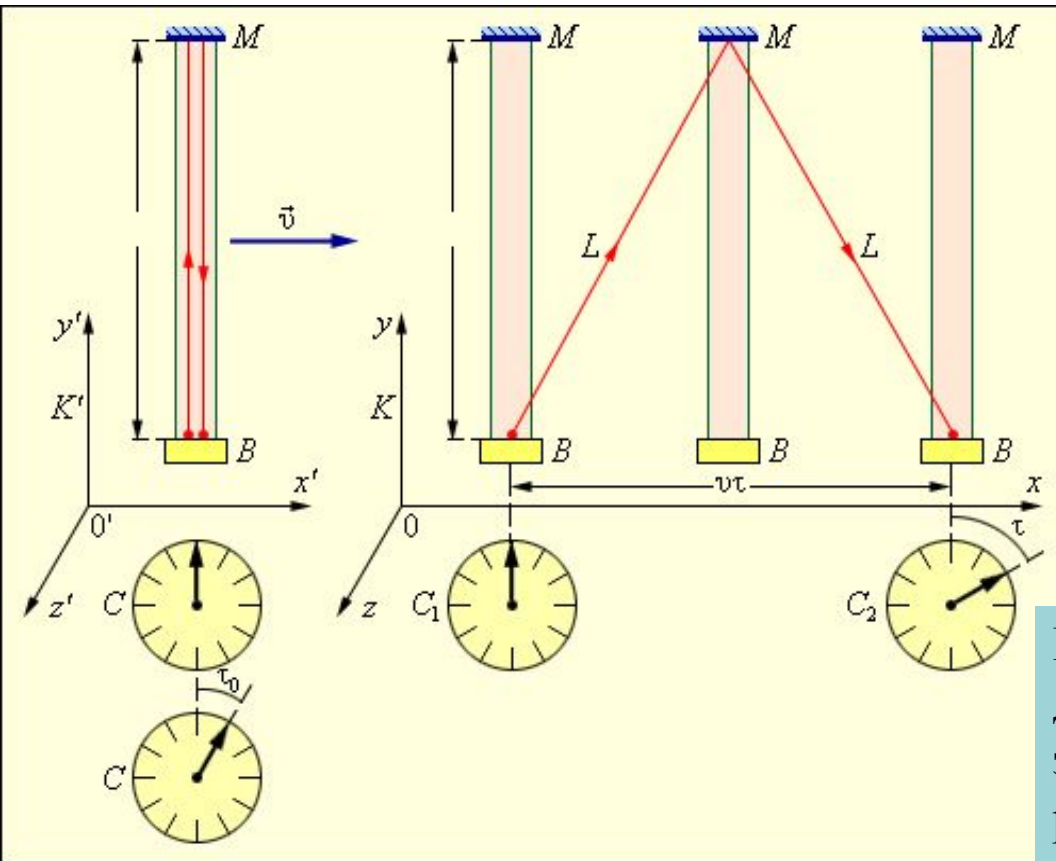
$$x_1 = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad t_1 = \frac{t - \frac{xv}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad y_1 = y$$
$$z_1 = z$$

Для упрощения записи удобно ввести обозначение

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



# Относительность интервала времени



В системе  $K'$  оба рассматриваемых события происходят в одной и той же точке. Свет проходит расстояние  $2l$ .  
Промежуток времени между событиями (собственное время) равен

$$\tau_0 = 2l / c.$$

В системе  $K$ , световой импульс движется между зеркалами зигзагообразно и проходит путь  $2L$ , равный:

$$2L = 2\sqrt{l^2 + \left(\frac{v\tau}{2}\right)^2}$$

Так, как 
$$L^2 = l^2 + \left(\frac{v\tau}{2}\right)^2$$

# Относительность интервала времени

Согласно второму постулату СТО, световой импульс двигался в системе К с той же скоростью  $c$ , что и в системе К'.

Следовательно,

$$\tau = 2L / c \quad \longrightarrow \quad L = \frac{\tau c}{2}$$

$$\text{Из } \tau_0 = 2l / c \quad \longrightarrow \quad l = \frac{\tau_0 c}{2}$$

$$\left(\frac{\tau c}{2}\right)^2 = \left(\frac{\tau_0 c}{2}\right)^2 + \left(\frac{\tau v}{2}\right)^2$$

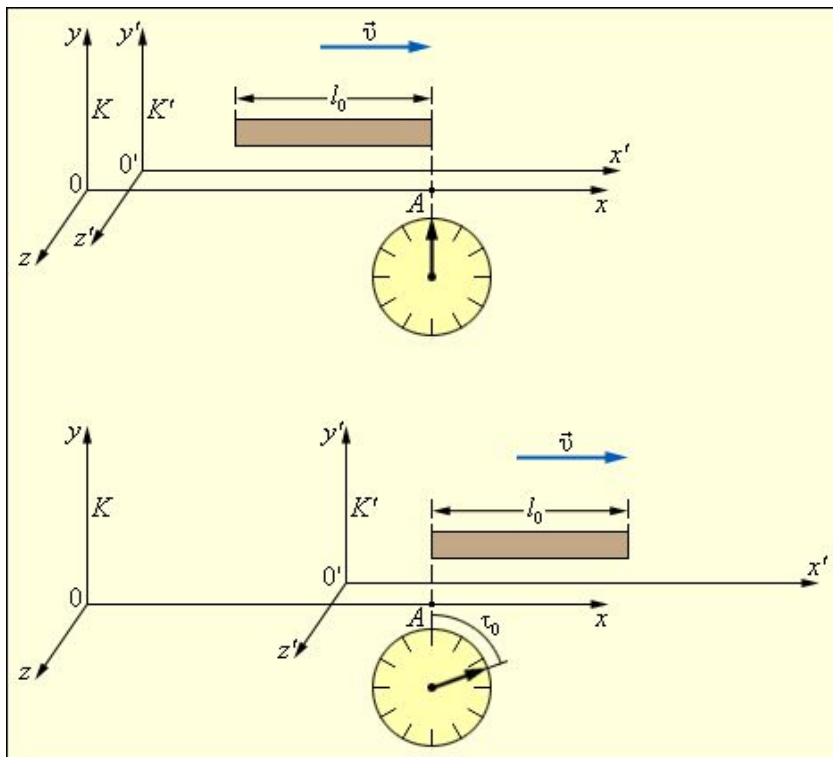
$$\tau = \tau_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \tau_0 \gamma$$

Промежуток времени между двумя событиями зависит от системы отсчета, то есть является **относительным**.

**Собственное время  $\tau_0$**  всегда меньше, чем промежуток времени между этими же событиями, измеренный в любой другой системе отсчета.

Этот эффект называют **релятивистским замедлением времени**. Замедление времени является следствием инвариантности скорости света

# Относительность расстояний



В системе К' стержень покоится, его длина

$$l_0 = x_{02} - x_{01}$$

Система К', движется вдоль Х влево со скоростью v.

Система К неподвижна, в ней длина стержня:  $l = x_2 - x_1$

$$l_0 = x_{02} - x_{01} = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma l$$

# Относительность расстояний

Таким образом, длина стержня зависит от системы отсчета, в которой она измеряется, то есть является относительной величиной. Длина стержня оказывается **наибольшей в той системе отсчета, в которой стержень покоится.** Движущиеся относительно наблюдателя тела сокращаются **в направлении своего движения.**

Этот релятивистский эффект носит название **лоренцева сокращения длины**

Вместо классического импульса в СТО вводится  
**релятивистский импульс**

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m\vec{v}\gamma$$

**Основной закон релятивистской динамики** материальной точки записывается так же, как и второй закон Ньютона:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}, \quad \vec{F} = \frac{d}{dt} \left( \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) = \frac{d(m\vec{v}\gamma)}{dt}$$

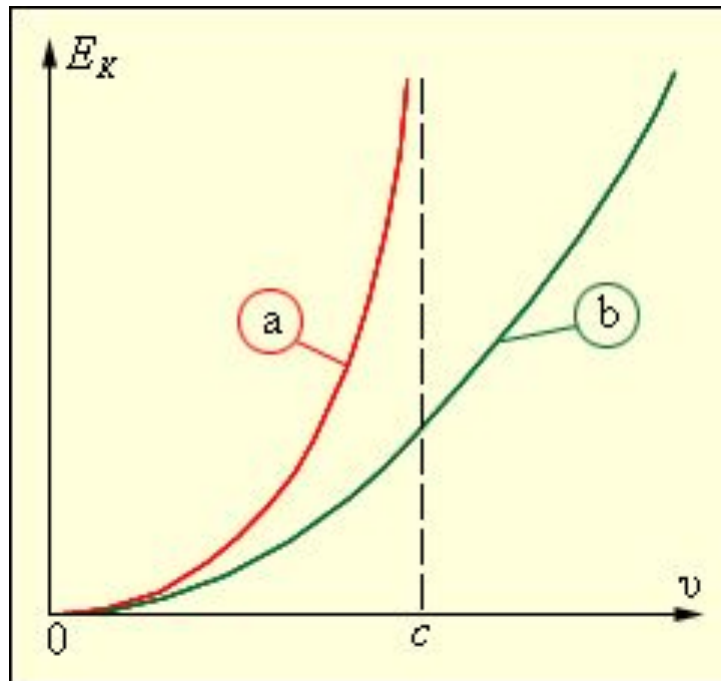
## Элементы релятивистской динамики

- Постоянная по модулю и направлению сила не вызывает равноускоренного движения. Например, в случае **одномерного движения** вдоль оси  $x$  ускорение частицы

$$a = \frac{F}{m} \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{\frac{3}{2}}.$$

- Если скорость классической частицы беспредельно растет под действием постоянной силы, то скорость релятивистской частицы **не может превысить скорость света  $c$  в пустоте**

# Элементы релятивистской динамики



Изменение кинетической энергии частицы в зависимости от ее скорости:

b - для частиц, подчиняющихся классическому

a - релятивистскому законам



## Элементы релятивистской динамики

Кинетическая энергия тела  $E_k$  определяется через работу внешней силы, необходимую для сообщения телу заданной скорости

$$A = \int F \cdot dx = \int F \cdot v \cdot dt = \int \frac{mav dt}{\left(1 - v^2 / c^2\right)^{3/2}}$$

$$E_k = A = \int_0^{v_0} \frac{mv dv}{\left(1 - v^2 / c^2\right)^{3/2}}$$

## Элементы релятивистской динамики

- Вычисление этого интеграла приводит к следующему выражению для кинетической энергии

$$E_k = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2 = mc^2 (\gamma - 1)$$

Эйнштейн интерпретировал первый член в правой части этого выражения как **полную энергию**  $E$  движущейся частицы, а второй член как **энергию покоя**  $E_0 = mc^2$

# Элементы релятивистской динамики

Формула Эйнштейна

$$E_0 = mc^2$$

выражает фундаментальный закон природы, который  
принято называть

**законом взаимосвязи массы и энергии**

## Элементы релятивистской динамики

Комбинируя выражение для релятивистского импульса и выражение для полной энергии  $E$ , можно получить соотношение, связывающее эти величины

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2.$$

Отсюда еще раз следует, что для покоящихся частиц

$$(p = 0) E = E_0 = mc^2$$

Полученное соотношение показывает, что частица может иметь **энергию** и **импульс**, но не иметь **массы** ( $m = 0$ ). Такие частицы называются **безмассовыми**. Для безмассовых частиц связь между энергией и импульсом выражается простым соотношением

$$E = pc$$

# Элементы релятивистской динамики