

СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

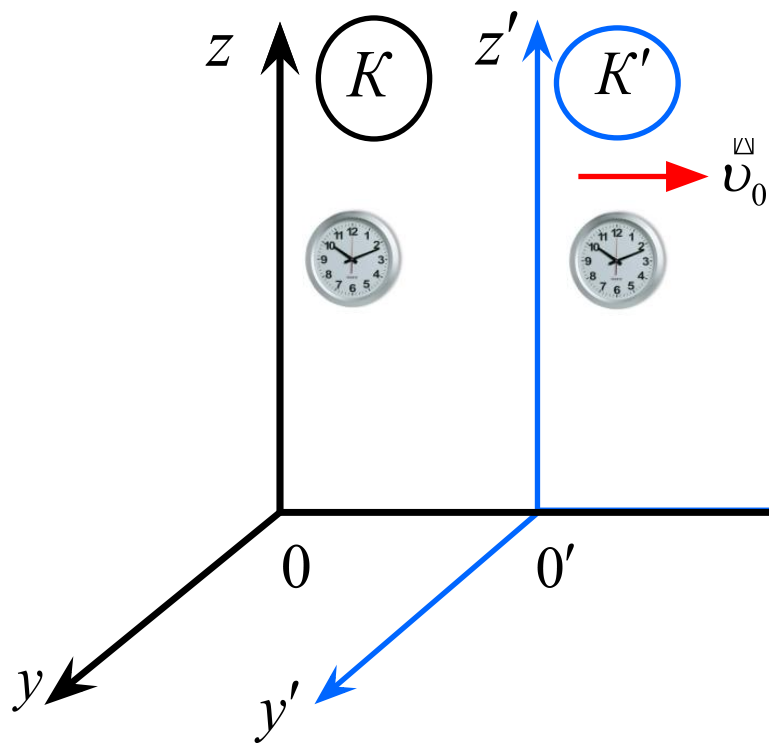
Преобразования Галилея.

Инвариантность законов механики к преобразованиям

Принцип относительности Галилея.

Все инерциальные системы отсчета (ИСО) эквивалентны друг другу. Никакими механическими опытами, проведенными в данной ИСО, нельзя определить, движется система или нет.

Во всех ИСО свойства пространства и времени одинаковы.



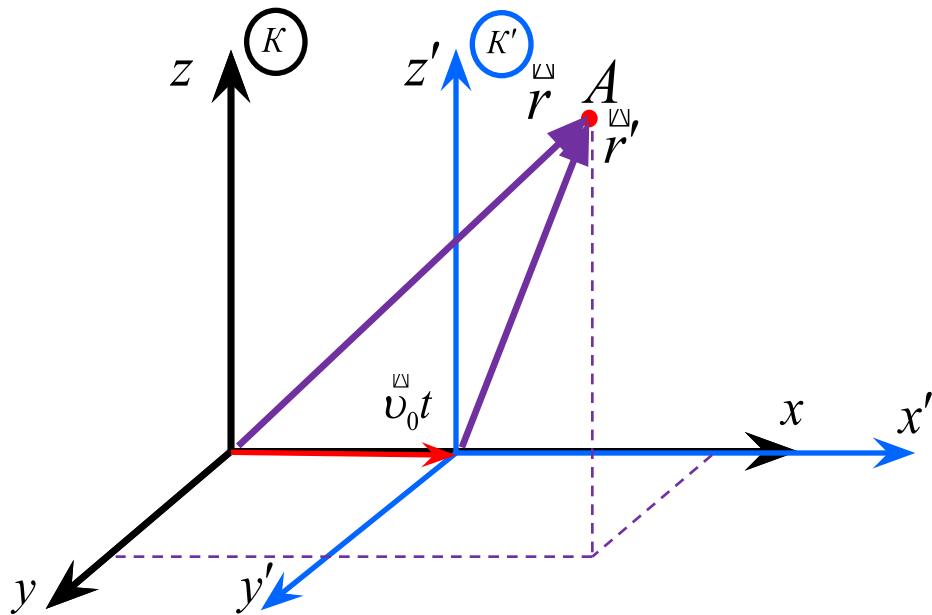
Рассмотрим две ИСО:

$K(x, y, z)$, систему K считаем неподвижной.
и $K'(x', y', z')$

Оси K и K' сонаправлены.

K' движется относительно K с постоянной скоростью v_0 вдоль оси x.

Преобразования Галилея



$$x' = x - v_0 t$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Преобразования
для координат

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{v}_0 t$$

$$v'_x = \frac{dx'}{dt} = \frac{dx}{dt} - v_0 = v_x - v_0$$

$$v'_y = \frac{dy'}{dt} = v_y$$

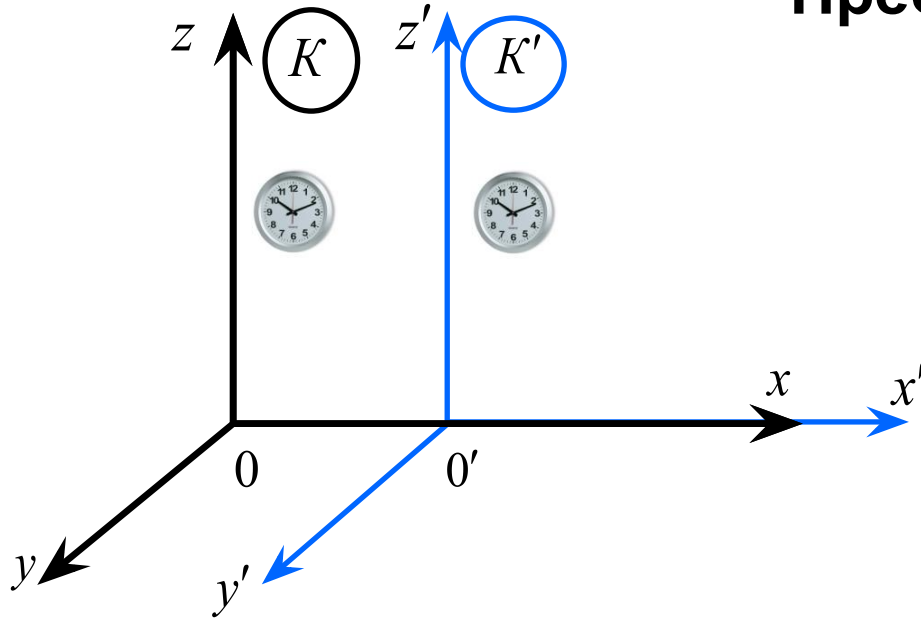
$$v'_z = \frac{dz'}{dt} = v_z$$

Преобразования
для скоростей

Правило сложения
скоростей

$$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{v}_0$$

Преобразования Галилея



Преобразования для ускорения

$$\vec{a}' = \frac{d\vec{v}'}{dt} = \frac{d(\vec{v} - \vec{v}_0)}{dt} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{a}$$

Ускорение одинаково во всех ИСО.

⇓ **Инертная масса**

Масса, сила и время одинаковы во всех ИСО.

$$\left\{ \begin{array}{l} m' = m \\ \vec{F}' = \vec{F} \\ \underline{t' = t} \end{array} \right.$$

Второй и третий законы Ньютона имеют одинаковый вид во всех ИСО.

Второй и третий законы Ньютона **инвариантны** по отношению к преобразованиям Галилея.

Законы классической механики инвариантны относительно преобразований Галилея.

Гипотеза «светоносного (мирового) эфира»



всепроницающая неподвижная субстанция, в которой распространяется свет и другие электромагнитные волны.

Световые волны распространяются в мировом эфире со скоростью c , независимо от скорости движения источника света (как звуковые волны в воздухе).

Пусть ИСО движется со скоростью v навстречу световой волне.

Согласно правилу сложения скоростей, скорость света относительно этой ИСО будет $c + \dots$.

Именно так увеличивается наблюдаемая скорость звука при движении в сторону источника звука. Наблюдатель, движущийся сквозь неподвижный воздух ощущает ветер.

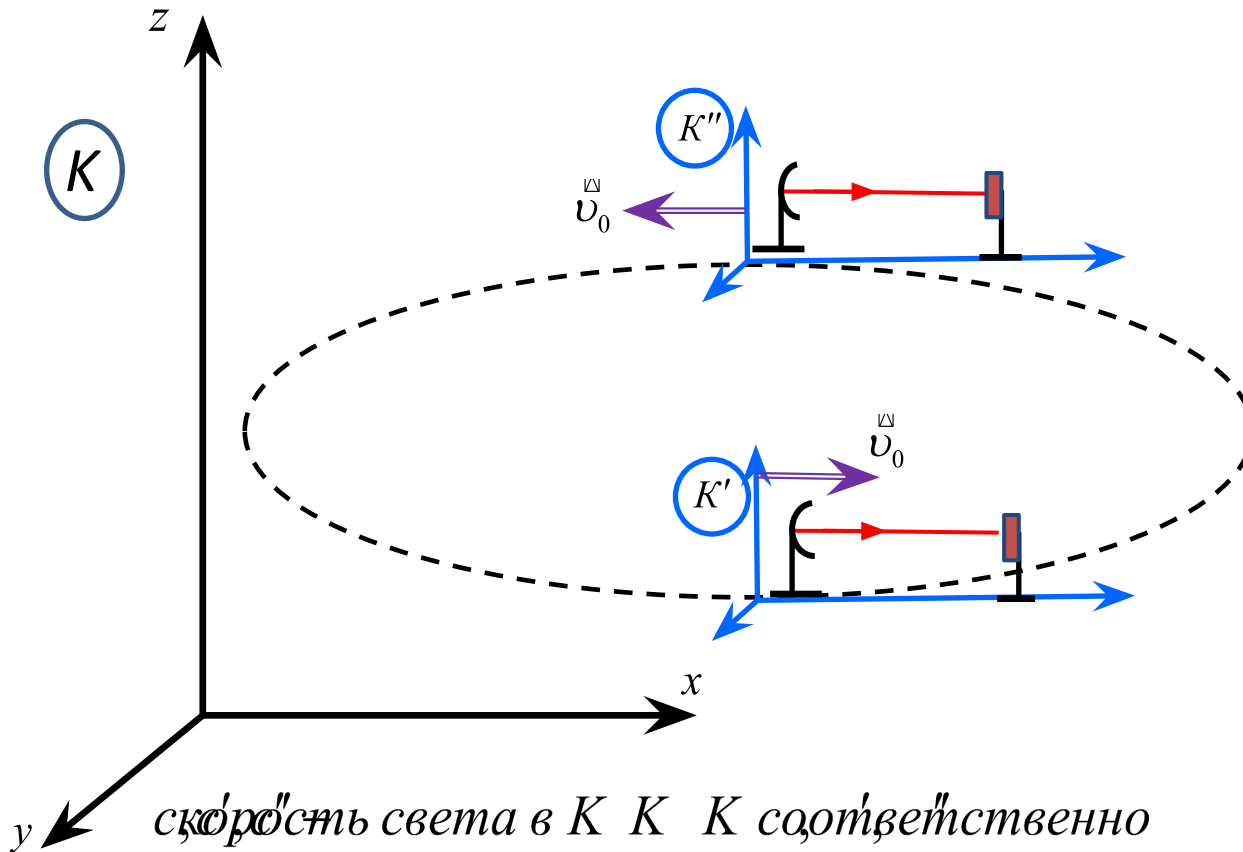
Движение сквозь неподвижный эфир – «эфирный ветер».

Мировой эфир – абсолютная ИСО!!

Если так, измеряя скорость света в данной ИСО (на Земле) можно найти её скорость, т.е. установить факт её движения.

Не противоречит относительности принципу Галилея: измерение скорости света - **не механический** опыт.

Идея опыта Майкельсона и Морли.



$$K' \Rightarrow c' = c - v_0$$

Через полгода:

$$K'' \Rightarrow c'' = c + v_0$$



Ожидаемый
результат

$$c'' - c' = 2v_0$$



$$v_0 = \frac{c'' - c'}{2} !$$

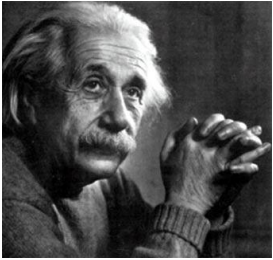
Результат: скорость света во всех экспериментах одинаковая : $c' = c'' = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} !!!$

Неподвижного мирового эфира нет!

Трудности классической физики

1. Отрицательный результат опыта Майкельсона-Морли.
2. Неинвариантность уравнений Максвелла к преобразованиям Галилея

Постулаты специальной теории относительности Эйнштейна



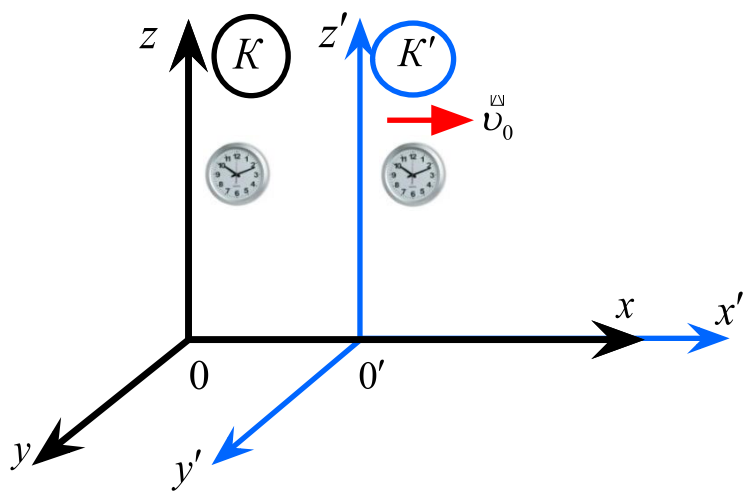
1. ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Все инерциальные системы отсчета (ИСО) эквивалентны друг другу. Никакими физическими опытами, проведенными в данной ИСО, нельзя определить, движется система или нет. Во всех ИСО свойства пространства и времени одинаковы.

2. ПРИНЦИП ПОСТОЯНСТВА (инвариантности) СКОРОСТИ СВЕТА

Скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчета и не зависит от того движется или покоится источник света.

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$



Преобразования Лоренца

$$(x, y, z, t) \Rightarrow (x', y', z', t') \quad ??$$

Преобразования

Галилея

$$x = x' + v_0 t, \quad x' = x - v_0 t,$$

$$y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t$$

**Постулатам
Эйнштейна
удовлетворяют
преобразования
Лоренца**

$$x' = \frac{x - v_0 t}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}, \quad x = \frac{x' + v_0 t'}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}},$$

$$y' = y, \quad z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{v_0}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}, \quad t = \frac{t' + \frac{v_0}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}.$$

По отношению к преобразованиям Галилея уравнения классической механики инвариантны, а уравнения Максвелла –

нет

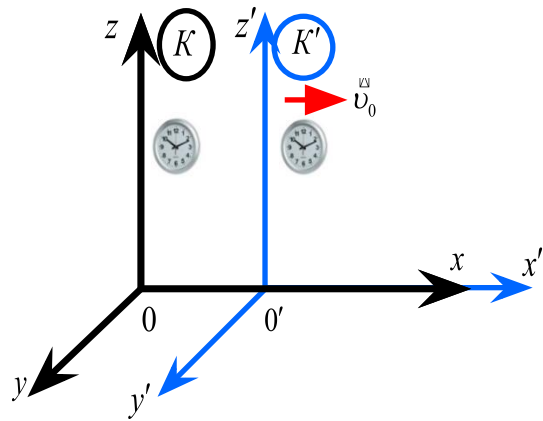
По отношению к преобразованиям

Лоренца уравнения Максвелла инвариантны, в частности, **скорость света $c = const$ во всех ИСО.**

уравнения классической механики **не** инвариантны и в общем случае **неверны**.

Однако

При $v \ll c$ преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея и, **классические уравнения механики сохраняют свой вид.**



Преобразования Галилея для времени

$$t' = t$$

Если события одновременны в одной ИСО, они одновременны и в любой другой ИСО

В разных ИСО длительность данного промежутка времени одна и та же.

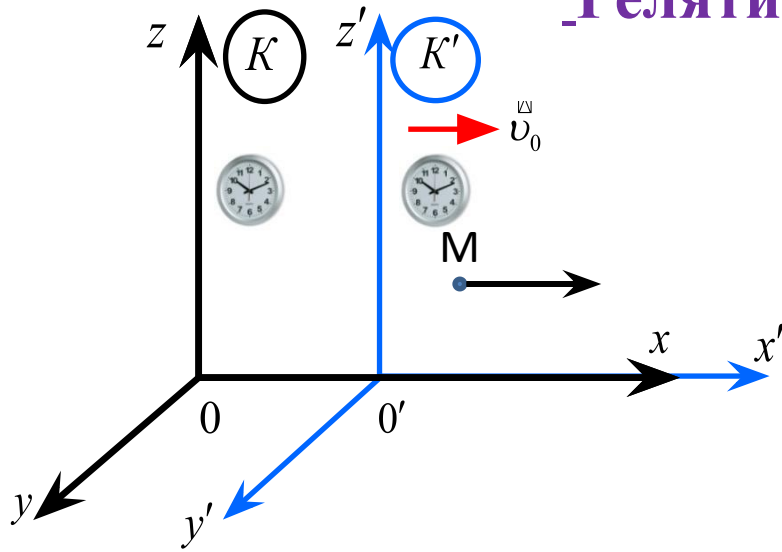
Преобразования Лоренца для времени

$$t' = \frac{t - \frac{v_0}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}, \quad t = \frac{t' + \frac{v_0}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}$$

Понятие одновременности – относительно: то, что для наблюдателя в одной ИСО происходит одновременно, неодновременно для наблюдателя в другой ИСО (!).

Длительность промежутков времени - относительна: время в подвижной системе отсчета течет медленнее, чем в покоящейся системе отсчета .

Релятивистский закон сложения скоростей



Точка М движется в направлении x в системе K со скоростью v .

В системе K' скорость точки М v' .

Как связаны v и v' ?

Релятивистский закон сложения скоростей

$$v = \frac{v' + v_0}{1 + \frac{v_0 v'}{c^2}}$$

$$\text{При } v' \ll c \quad v = v' + v_0$$

$$\text{При } v' = c \quad v = c (!!)$$

Скорость любых тел и их взаимодействий не превосходит скорость света (в классической механике постулируется мгновенность взаимодействий).

Релятивистский импульс

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

Релятивистское уравнение движения

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$$

Справедливо при любых скоростях $v \approx c$ включая $v = c$, но импульс

релятивистский

Пусть действует постоянная сила, направленная вдоль x

$$\frac{d}{dt} \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \vec{F}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = F \longrightarrow \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = Ft$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{1 + \frac{m^2 c^2}{F^2 t^2}}}$$

$\left. \begin{array}{l} \text{малые } t \quad v \approx \frac{F}{m}t = at \\ t \rightarrow \infty \quad v \rightarrow c \end{array} \right\}$

Нельзя ускорить тело (частицу), имеющее массу, до скорости света!!

Легко проверить с помощью ускорителя электронов. Начиная с ускоряющего потенциала $\sim 10^5$ В, рост скорости электронов замедляется с ростом ускоряющего потенциала и ни при каких условиях не превосходит

Релятивистская энергия

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

$$v = 0 \quad E = mc^2$$

Энергия покоя Ядерная физика - дефект массы

$$v \ll c \quad E = mc^2 + \frac{mv^2}{2}$$

$E > 0, \quad m > 0 \rightarrow 1 - \frac{v^2}{c^2} > 0 \rightarrow v < c$ Скорость массивного тела всегда меньше скорости света.

Если масса частицы $m=0$ (фотон), а энергия не равна 0, должно быть

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = 0 \rightarrow v = c$$

Частицы с нулевой массой
ОБЯЗАНЫ двигаться со скоростью света!