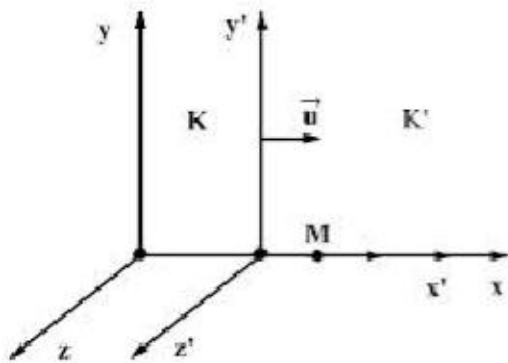


## Лекция 9

# СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

# Принцип относительности Галилея



$$t = t'$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$x = x' + ut'$$

$$\vec{V} = \vec{V}' + \vec{u}$$

*Инерциальные системы отсчета равноправны в классической механике, законы механики одинаковы в таких системах.*

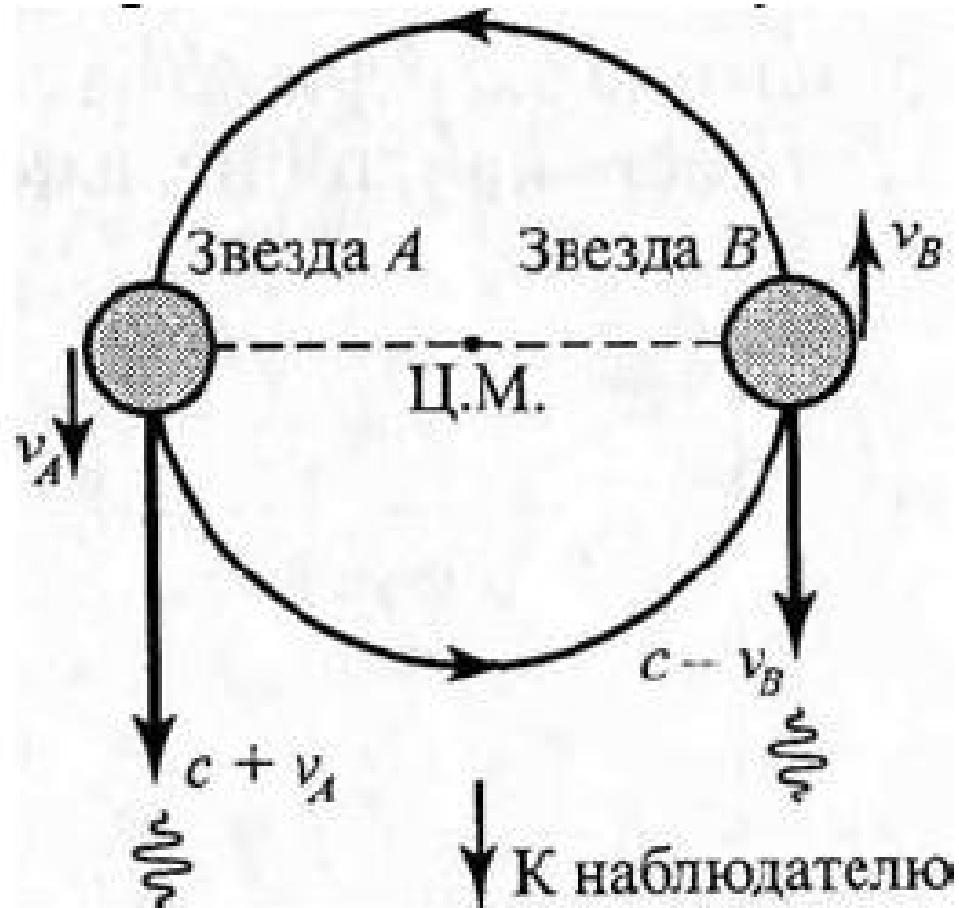
*Если в двух системах, одна из которых равномерно и прямолинейно движется относительно другой, провести одинаковый механический эксперимент, результат будет одинаковым.*

*Находясь в инерциальной системе, невозможно определить, покоится она или движется. Законы механики инвариантны относительно преобразований Галилея.*

Классическая механика удовлетворяет принципу относительности Галилея. Электромагнитное поле описывается уравнениями Максвелла. Максвелл полагал, что они справедливы для специальной среды – эфира.

Опыт Майкельсона по измерению скорости Земли относительно эфира дал отрицательный результат. Движение не было обнаружено.

# Двойные звезды

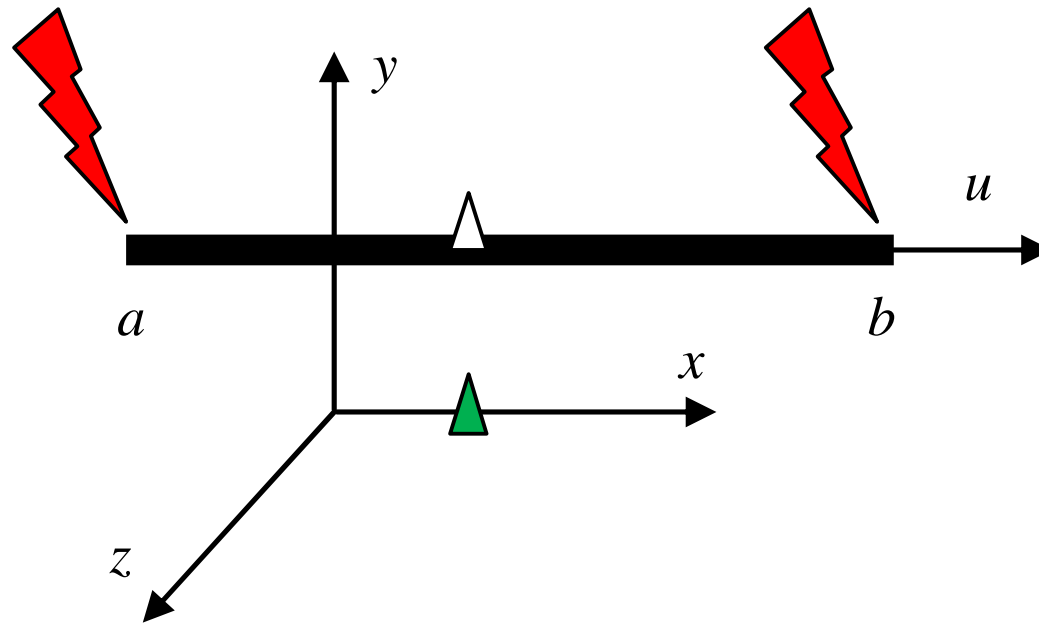


В опыте наблюдатель регистрирует одинаковую скорость света.

# Постулаты Эйнштейна:

- Принцип относительности: все законы природы инвариантны по отношению к переходу от одной инерциальной системы отсчета к другой.
- Принцип постоянства скорости света: скорость света в вакууме не зависит от движения источника или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчета.

# Относительность одновременности

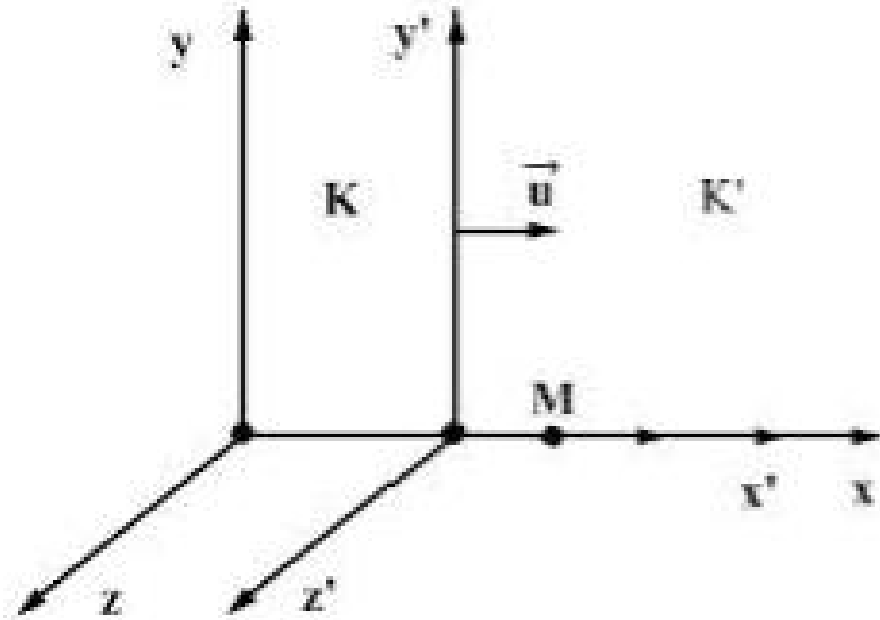


$$K \quad t_a = L/(2c) \quad t_b = L/(2c) \quad \Delta t = t_b - t_a = 0$$

$$K' \quad t'_a = (L-l)/(2c) \quad t'_b = (L+l)/(2c) \quad \Delta t' = t'_b - t'_a = l/c \neq 0$$

События могут быть одновременными, происходить раньше и позже в разных инерциальных системах. За исключением причинно-связанных.

# Преобразования Лоренца



$$\beta = u/c$$

$$K' \rightarrow K \quad x = \frac{x' + ut'}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad y = y' \quad t = \frac{t' + x'u/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$K \rightarrow K' \quad x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad y' = y \quad t' = \frac{t - xu/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

## Принцип соответствия

$$u \ll c$$

$$\beta \ll 1$$

$$\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \approx 1 + \frac{\beta^2}{2}$$

$$x = x' + ut'$$

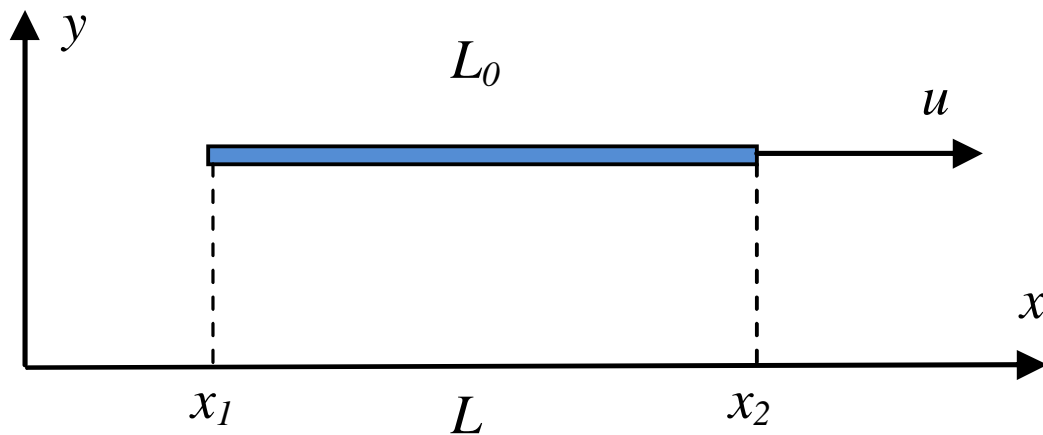
$$y = y'$$

$$t = t'$$

При малых скоростях преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея.



# Лоренцево сокращение длины



$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$\Delta t = 0$$

$$\Delta x = x_2 - x_1$$

$$\Delta x' = \frac{x_2 - ut}{\sqrt{1 - \beta^2}} - \frac{x_1 - ut}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{\Delta x}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$L = L_0 \sqrt{1 - \beta^2}$$

# Лоренцево замедление времени

Пусть в системе  $K'$  в точке с координатой  $x' = b$  последовательно в моменты времени  $t'_1$  и  $t'_2$  происходят события.

$$\Delta t' = t'_2 - t'_1$$

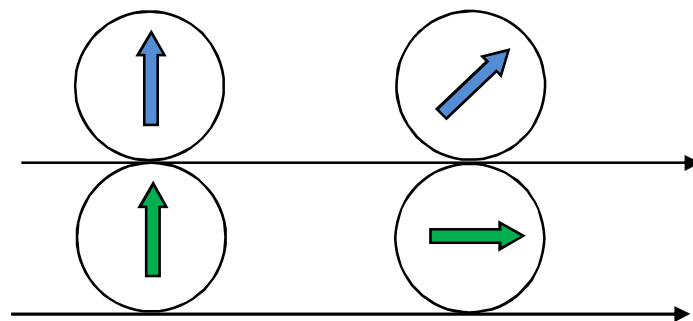
В системе  $K$  эти события будут зарегистрированы в моменты времени

$$t_1 = \frac{t'_1 + bu/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$t_2 = \frac{t'_2 + bu/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$\Delta t = \Delta t' / \sqrt{1 - \beta^2}$$

## Движущиеся часы идут медленнее покоящихся



Среднее время жизни покоящегося мюона  $10^{-6}$  с. Даже двигаясь со скоростью света, мюон может пролететь всего 300 м. Образываясь в верхних слоях атмосферы, мюоны, тем не менее, достигают поверхности земли, пролетая не менее 20 км.

Для земного наблюдателя бортовые атомные часы на спутниках GPS запаздывают примерно на 7 микросекунд в день. Для правильной работы систем навигации часы подвергаются специальной калибровке.

# Закон сложения скоростей

$$V_x = dx/dt$$

$$V_y = dy/dt$$

$$dx' = \frac{dx - udt}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$dy' = dy$$

$$dt' = \frac{dt - dx \cdot u/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$V'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx - udt}{dt - (u/c^2)dx}$$

$$V'_y = \frac{dy'}{dt'} = \frac{dy\sqrt{1 - \beta^2}}{dt - (u/c^2)dx}$$

$$V'_x = \frac{V_x - u}{1 - (u/c^2)V_x}$$

$$V'_y = \frac{V_y\sqrt{1 - \beta^2}}{1 - (u/c^2)V_x}$$

Релятивистский закон сложения скоростей переходит в классическое выражение

$$u \ll c \qquad V'_x = V_x - u$$

Вдоль оси  $x$  движется тело со скоростью  $c$ . В системе отсчета  $K'$  его скорость также будет равняться  $c$ .

$$V'_x = \frac{c - u}{1 - (u/c^2)c} = c \frac{c - u}{c - u} = c$$

# Инварианты СТО

Инвариант — параметр, не зависящий от условий наблюдения, одинаковый в различных системах отсчета.

В ИСО инварианты: законы природы, скорость света, электрический заряд.

## Пространственно-временной интервал

Событие 1:  $t_1$   $(x_1, y_1, z_1)$

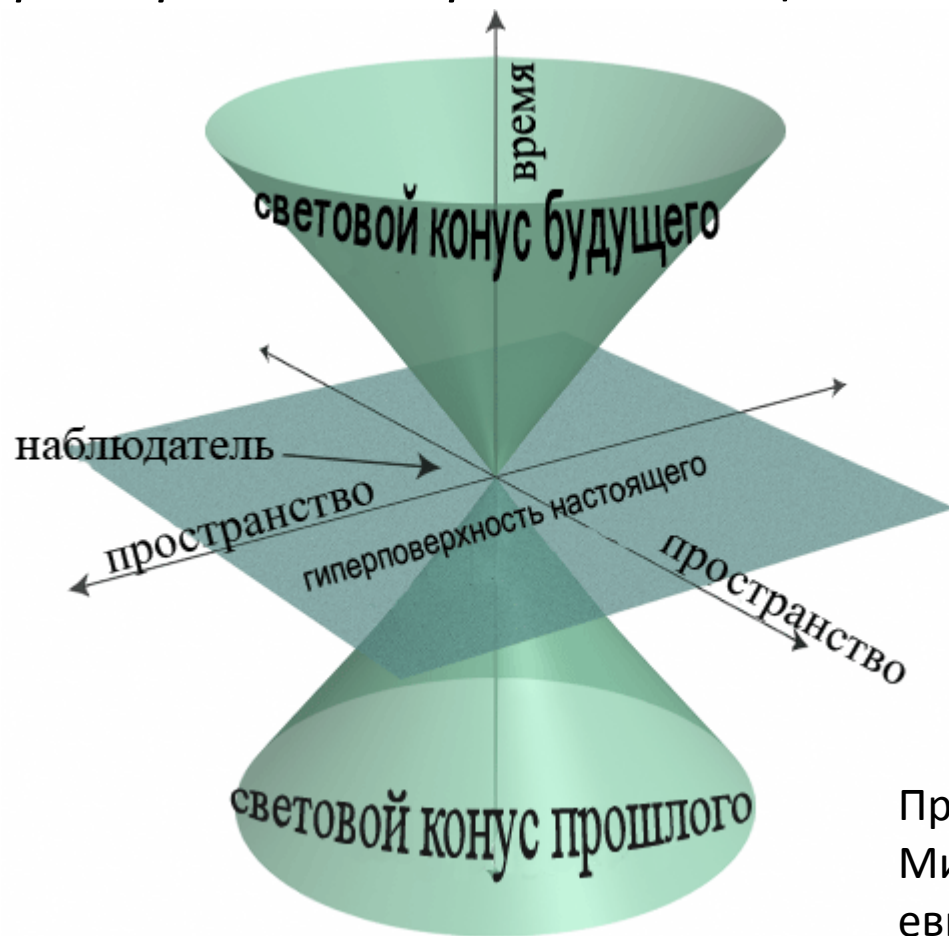
Событие 2:  $t_2$   $(x_2, y_2, z_2)$

$$l_{12} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad t_{12} = t_1 - t_2$$

$$s_{12} = \sqrt{c^2 t_{12}^2 - l_{12}^2} \quad s_{12} = s'_{12} = \text{inv}$$

# Мир (пространство) Минковского

Пространство Минковского — четырёхмерное пространство, предложенное в качестве геометрической интерпретации пространства-времени специальной теории относительности.



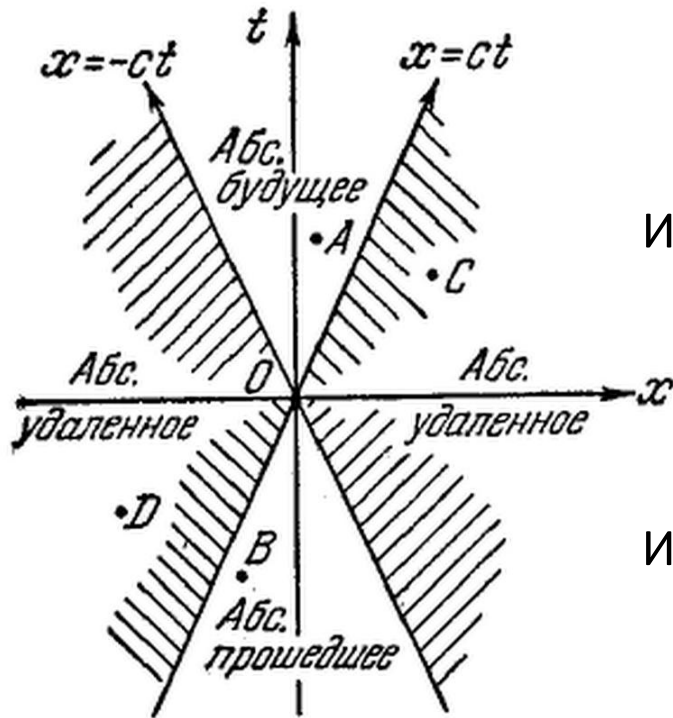
Мировая точка  $(x, y, z, ict)$

Мировая линия

Световой конус

Преобразования Лоренца в пространстве Минковского аналогичны вращениям в евклидовом пространстве.

Интервал — расстояние в пространстве Минковского.



$$s_{12} = \sqrt{c^2 t_{12}^2 - l_{12}^2}$$

Интервал  $OA$  времениподобный

$$s_{12}^2 > 0$$

Интервал  $OC$  пространственноподобный

$$s_{12}^2 < 0$$

Последовательность событий в любой системе отсчета:  $B, O, A$ .

События  $B$  и  $O$ ,  $O$  и  $A$  могут происходить в одном месте.

События  $D$  и  $O$ ,  $O$  и  $C$  могут происходить раньше, позже, одновременно, но всегда в разных точках.