

# Концепции и модели физики

Кузьмичев Сергей Дмитриевич



# СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИИ №5

1. Примеры применения законов сохранения импульса и энергии.
2. Постулаты специальной теории относительности. Принцип относительности Эйнштейна.
3. Релятивистская кинематика. Измерение времени и расстояний. Относительность одновременности.
4. Замедление времени и сокращение длины.
5. Преобразования Лоренца. Интервал.
6. Релятивистский закон сложения скоростей.
7. Примеры.

# 1. Примеры применения законов сохранения импульса и энергии.

Упругое столкновение двух шаров (центральный удар)

$$mv_0 = mv_x + MV, V_0 = 0$$

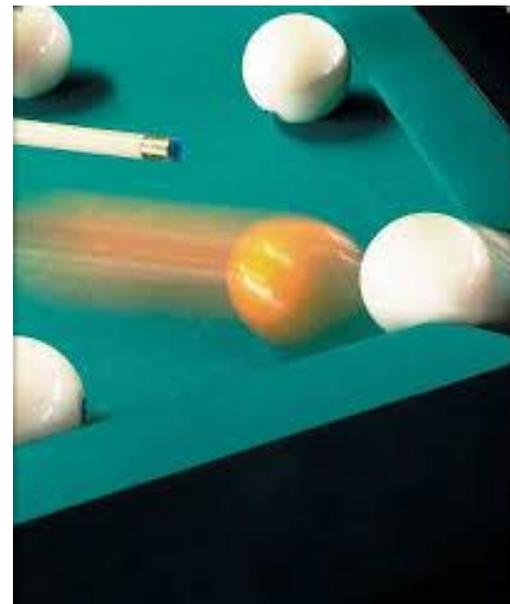
$$\frac{mv_0^2}{2} = \frac{mv_x^2}{2} + \frac{MV^2}{2}$$

$$v_x = \frac{m - M}{m + M} v_0, V = \frac{2m}{m + M} v_0$$

Частные случаи:

а)  $m = M$  ; б)  $m \ll M$  ;

в)  $m \gg M$



Доля энергии, потерянной при столкновении

$$K_0 = \frac{mv_0^2}{2}, \quad K = \frac{mv^2}{2} = \frac{mv_0^2}{2} \cdot \left( \frac{m - M}{m + M} \right)^2$$

$$\alpha = \frac{K_0 - K}{K_0} = \frac{4mM}{(m + M)^2}$$

$\alpha_{max} = 1$  при  $m=M$  (замедление нейтронов)

Неупругий центральный удар

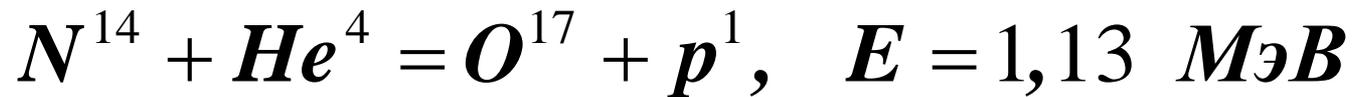
$$mv_0 = (m + M)u,$$

$$Q = \frac{mv_0^2}{2} - \frac{(m + M)u^2}{2} = \frac{mMv_0^2}{2(m + M)},$$

$$\frac{Q}{K_0} = \frac{M}{m + M}$$

## **Пороговая энергия реакции.**

Минимальное значение кинетической энергии налетающей частицы, при которой возможна реакция, называется *пороговой энергией реакции*. Такие реакции называют также *пороговыми реакциями*, поскольку они не происходят при энергиях частиц ниже порога.



$$K_C = \frac{p_0^2}{2(m_{He} + m_N)} = \frac{m_{He} E_0}{m_{He} + m_N}$$

$$E_0 = E + K_C = E + \frac{m_{He} E_0}{m_{He} + m_N}$$

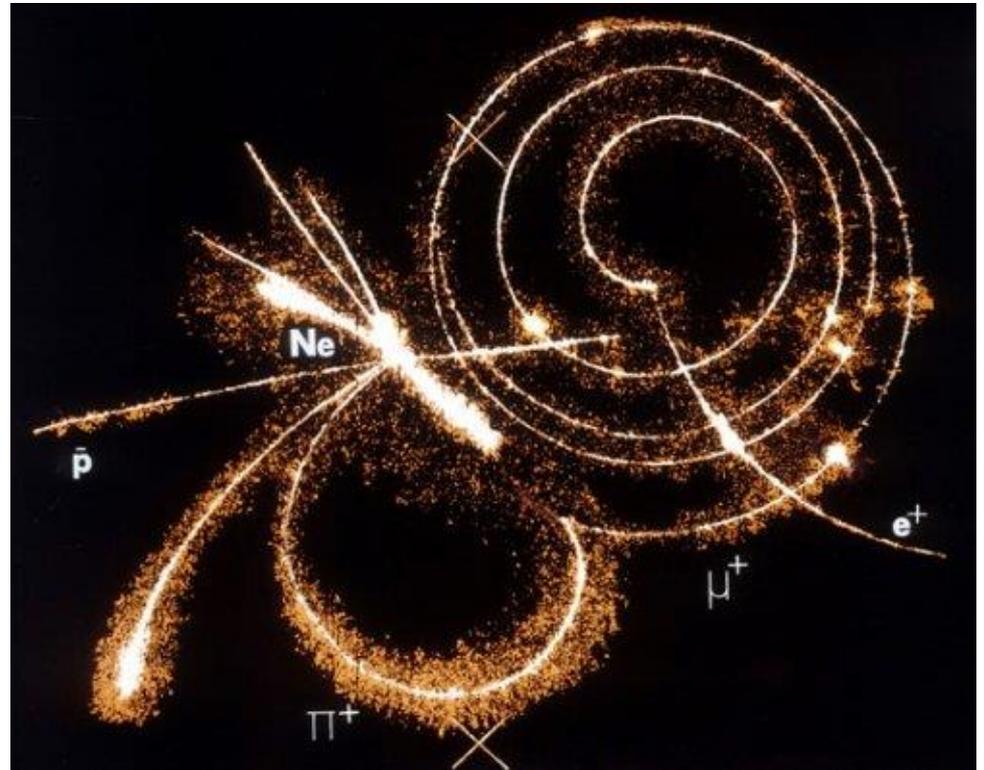
$$E_0 = \frac{m_{He} + m_N}{m_N} E = 1,45 \text{ МэВ}$$

# Нецентральное столкновение

(«мишень» массой  $m_2$  покоится)

- а)  $m_1 = m_2$  - направления разлета частиц перпендикулярны друг к другу.
- б)  $m_1 < m_2$  - угол рассеяния – любой
- в)  $m_1 > m_2$  - угол рассеяния не может превышать  $\varphi_{max}$

$$\sin \varphi_{max} = \frac{m_2}{m_1}$$



# Вторая космическая скорость

$$E_0 = K_0 + \Pi_0 = \\ = E_\infty = K_\infty + \Pi_\infty$$

$$K_0 = \frac{mv_{2,\kappa}^2}{2},$$

$$\Pi_0 = -G \frac{mM_3}{R_3}$$

$$K_\infty = 0, \quad \Pi_\infty = 0$$

$$v_{2,\kappa} = \sqrt{\frac{2GM_3}{R_3}} = \sqrt{2gR_3} \approx 11,2 \text{ км / с}$$



## 2. Постулаты специальной теории относительности (СТО)

**Постулат I.** *Все законы природы инвариантны по отношению к переходу от одной инерциальной системы координат к другой (во всех инерциальных системах отсчета физические законы имеют одинаковую форму).*

**Постулат II.** *Скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчета.*

Скорость света в вакууме является **предельной** скоростью передачи взаимодействий и сигналов из одной точки пространства в другую.

### **3. Релятивистская кинематика.**

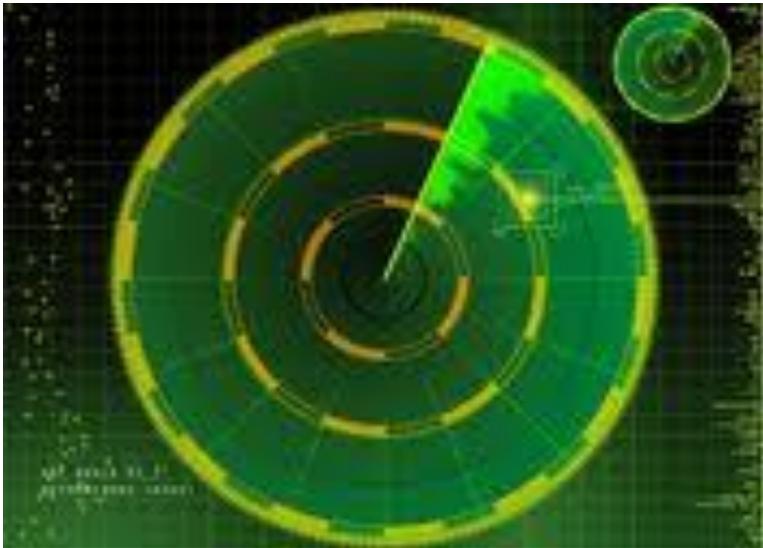
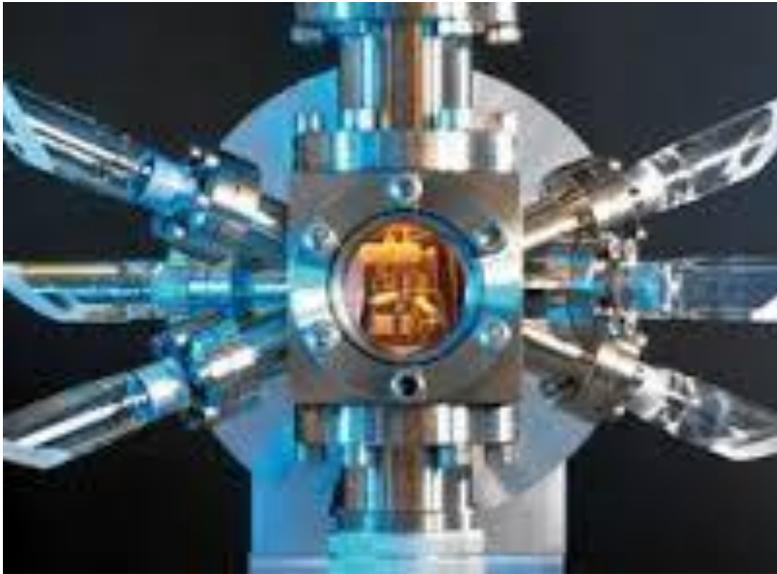
#### **Измерение времени и расстояний.**

#### **Относительность одновременности.**

**Событие** – физическое явление, происходящее в какой-либо **точке пространства** в некоторый **момент времени** в избранной системе отсчета.

Для измерения промежутка времени между двумя событиями, происходящими в **одной точке пространства** нужны **эталонные часы**.

Расстояние до предмета может быть определено **«радиолокационным способом»**.



Начало процесса –

показания часов  $t_1$

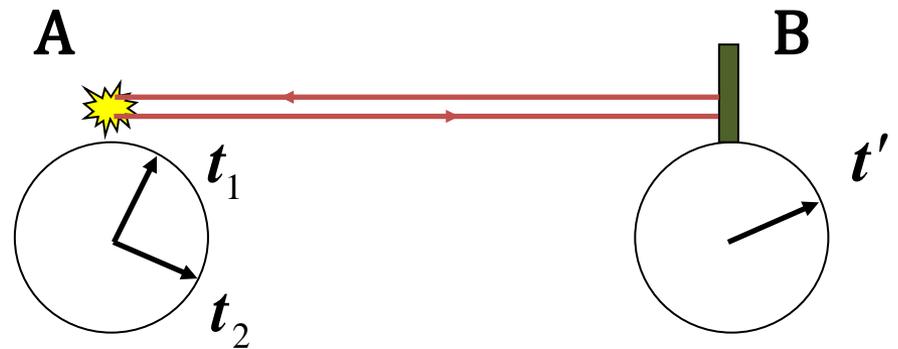
Окончание процесса –

показания часов  $t_2 > t_1$

Длительность процесса –

промежуток времени  $\tau = t_2 - t_1$

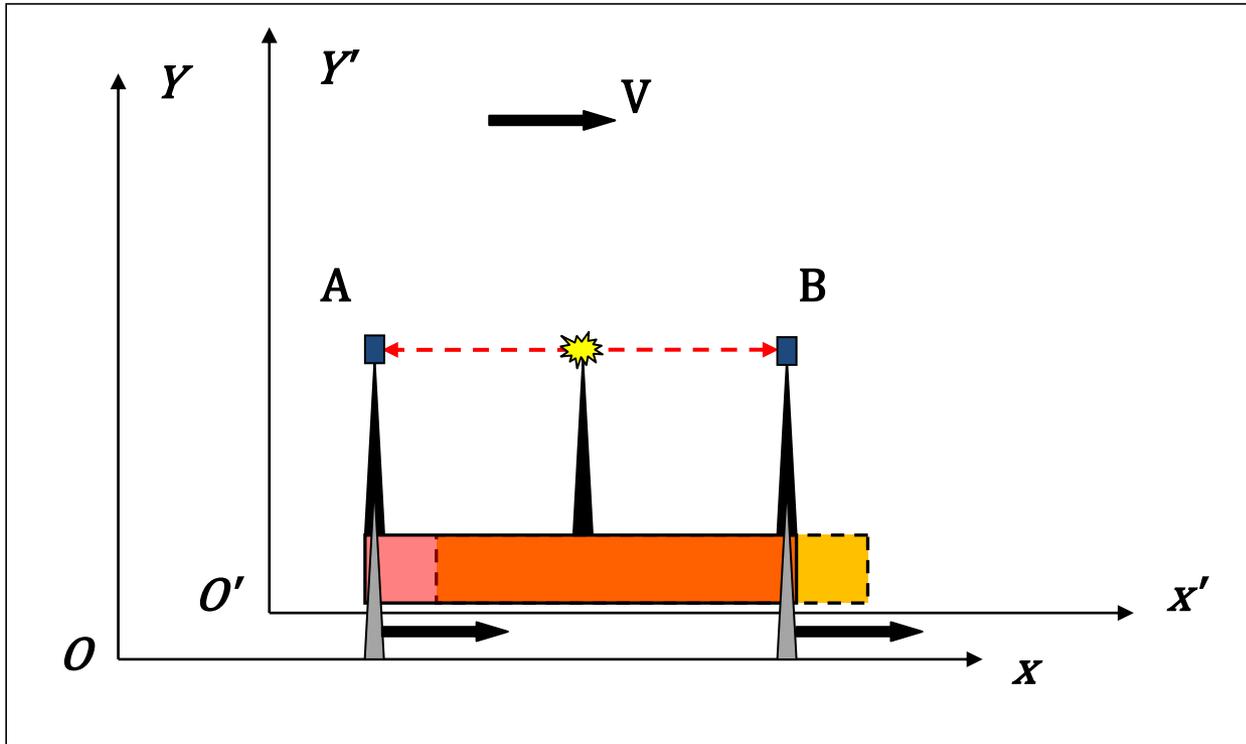
Синхронизация часов  
А и В, расположенных  
в разных точках  
системы отсчета.



$$t' = 0,5(t_1 + t_2)$$

События в разных точках произошли **одновременно**, если синхронизованные часы показывают одинаковое время.

# Относительность одновременности

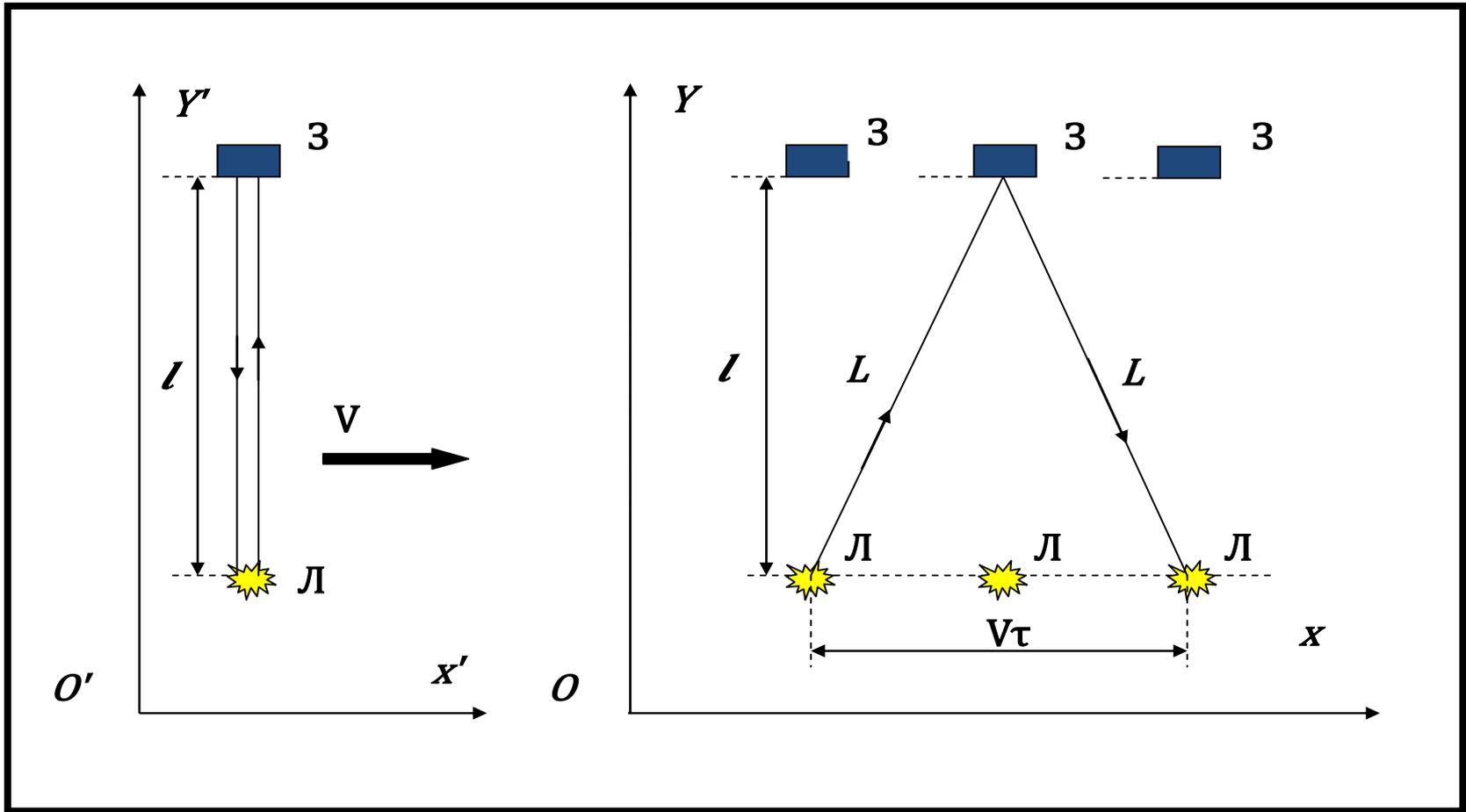


$$t'_A = t'_B = L / (2c), \quad t'_A - t'_B = 0$$

$$t_A = L / (2(c + V)), \quad t_B = L / (2(c - V)),$$

$$t_B - t_A = LV / (c^2 - V^2)$$

# 4. Замедление времени и сокращение длины

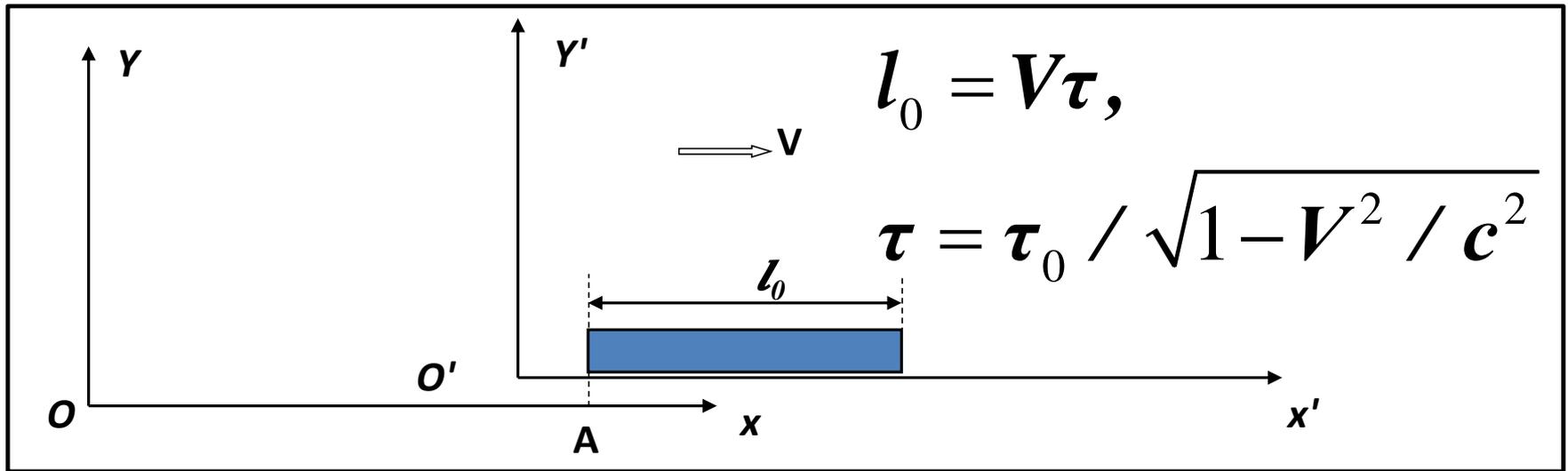
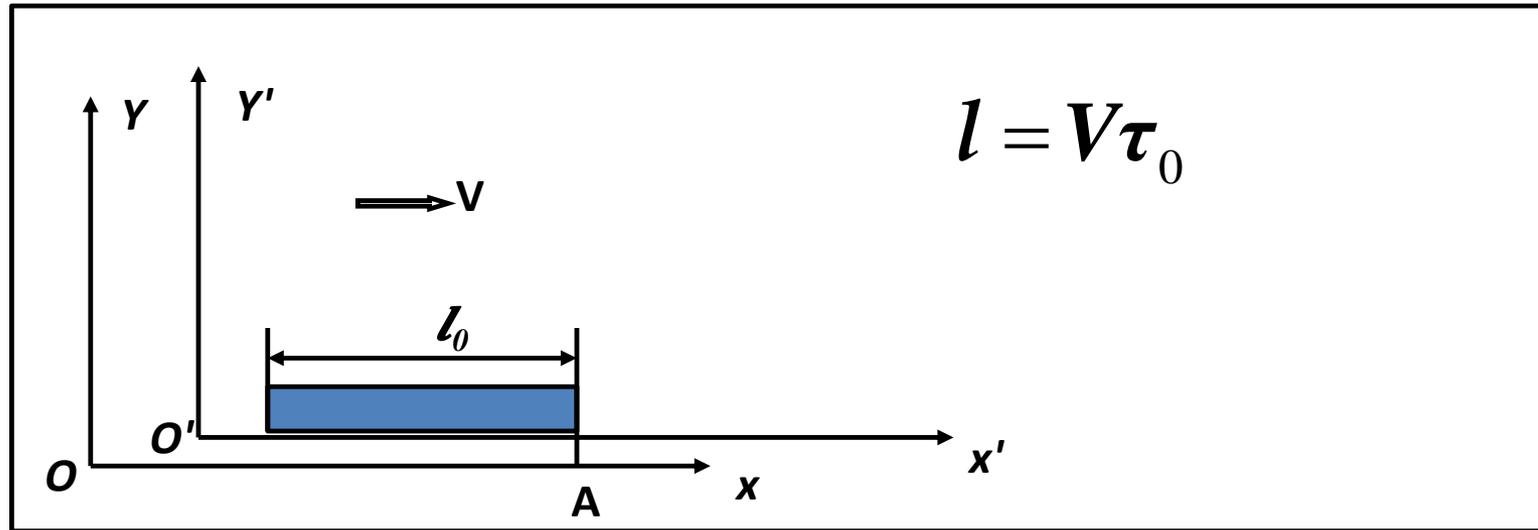


$$\tau_0 = 2l / c, \quad 2L = 2\sqrt{l^2 + \left(\frac{V\tau}{2}\right)^2} \quad \tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - V^2 / c^2}} > \tau_0$$

# Замедление времени



# Сокращение длины



$$l = l_0 \sqrt{1 - V^2 / c^2}$$

# 5. Преобразования Лоренца. Интервал.

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

$$x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

$$y' = y,$$

$$y = y',$$

$$z' = z,$$

$$z = z',$$

$$t' = \frac{t - \frac{Vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

$$t = \frac{t' + \frac{Vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

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

# Пространственно-временной интервал между событиями

Событие 1:  $t_1, x_1, y_1, z_1$

Событие 2:  $t_2, x_2, y_2, z_2$

Интервал между событиями 1 и 2

$$S_{12} = \sqrt{c^2 (t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2}$$

Пространственно-временной интервал между двумя событиями не изменяется при переходе из одной инерциальной системы координат в другую, т.е. является **инвариантом**.

## 6. Релятивистский закон сложения скоростей в СТО

$$v_x = \frac{v'_x + V_x}{1 + \frac{v'_x V_x}{c^2}},$$

$$v_y = \frac{v'_y \sqrt{1 - V_x^2 / c^2}}{1 + \frac{v'_x V_x}{c^2}},$$

$$v_z = \frac{v'_z \sqrt{1 - V_x^2 / c^2}}{1 + \frac{v'_x V_x}{c^2}}.$$

# Продольный эффект Доплера

Из начала отсчета системы  $K$  вдоль оси  $Ox$  через интервал времени  $T$  (по часам системы  $K$ ) посылаются кратковременные световые импульсы. Найти интервал времени, через который эти импульсы будут приходить к наблюдателю в системе  $K'$ , движущейся со скоростью  $V$ , учитывая относительность промежутков времени между событиями.

# Два звездолета

Расстояние между звездолетами  $L = 1,6$  св.с.

Они летят навстречу друг другу со скоростями  $v = 0,8$  с. Через какое время они встретятся:

- 1) по лабораторным часам?
- 2) по собственным часам?

1) Скорость сближения –  $2v$ ,  
 $\Delta t = L/2v = 1$  с

2) Относительная скорость  
 $v' = 2v/(1+\beta^2) = 0,975$  с < с

3) Время встречи по собственным часам  
рассчитаем через интервал:

$$s^2 = (c \Delta t)^2 - (L/2)^2$$

$$s'^2 = (c \Delta t_0)^2 \Leftrightarrow \Delta t_0 = [(\Delta t)^2 - (L/2c)^2]^{1/2} = 0,6$$
 с

# Близнецы

Близнецы Пётр и Павел расстались в тот день, когда им исполнилось по 21 году. Пётр отправился в направлении оси ОХ на 7 лет своего времени со скоростью  $24/25$  скорости света, после чего сменил скорость на обратную и за 7 лет вернулся назад, тогда как Павел оставался на Земле. Определите возраст близнецов к моменту их встречи.

