

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.

1.1. 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)

1.2. Неупругий центральный удар

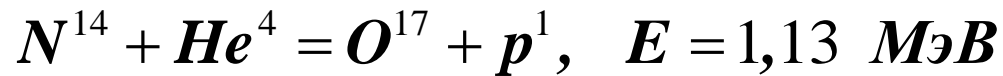
$$mv_0 = (m+M)u,$$

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

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



1.3. 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.



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

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

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

1.4. 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 φ_{max}

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





1.5. Вторая космическая скорость

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

$$K_0 = \frac{mv_{2,\kappa}^2}{2}, \quad \Pi_0 = -G \frac{mM_3}{R_3}$$

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

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



2. Постулаты специальной теории относительности

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.*

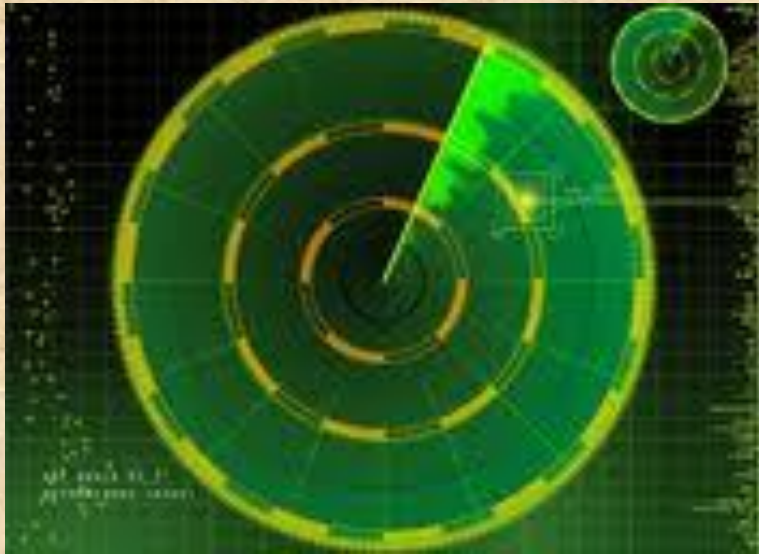
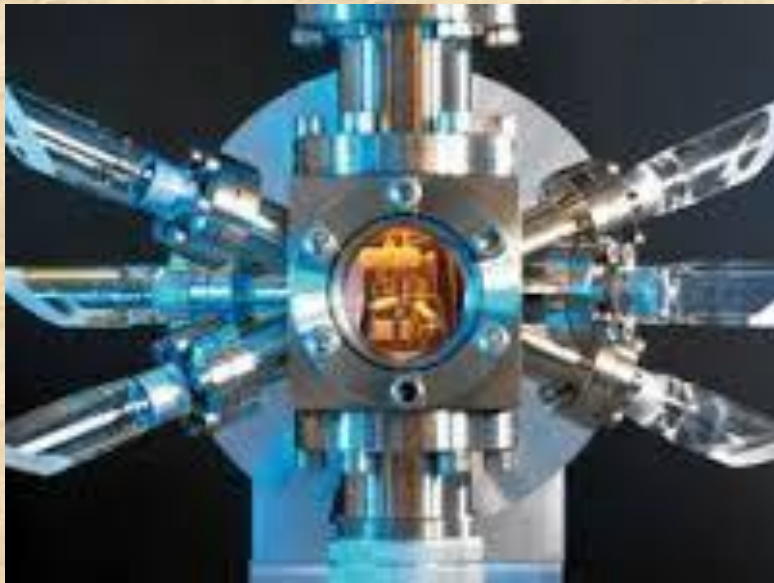
Скорость света в вакууме является предельной скоростью передачи взаимодействий и сигналов из одной точки пространства в другую.

3. Релятивистская кинематика. Измерение времени и расстояний. Относительность одновременности.

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

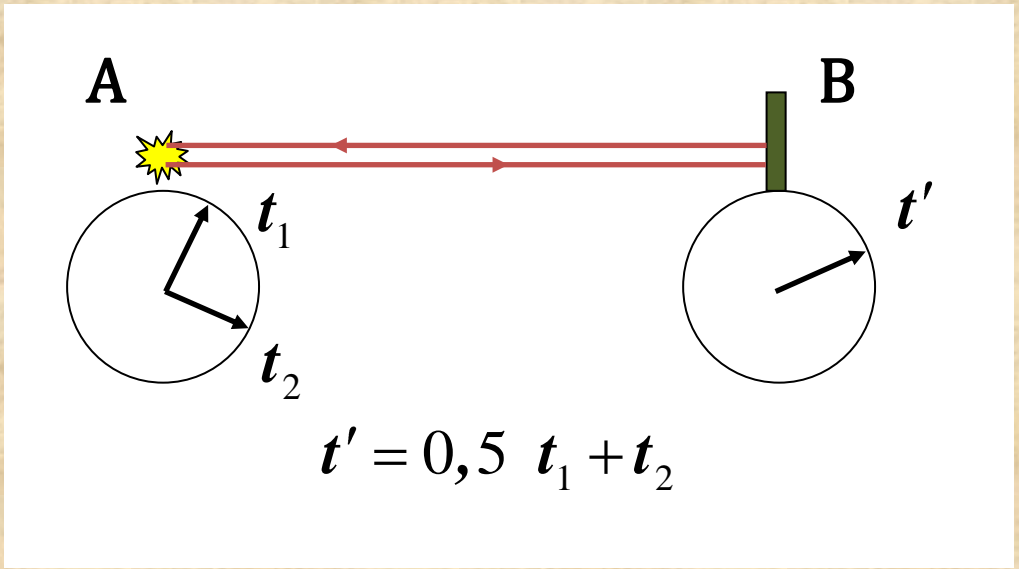
Для измерения промежутка времени между двумя событиями, происходящими в одной точке пространства нужны эталонные часы.

Расстояние до предмета может быть определено «радиолокационным способом».



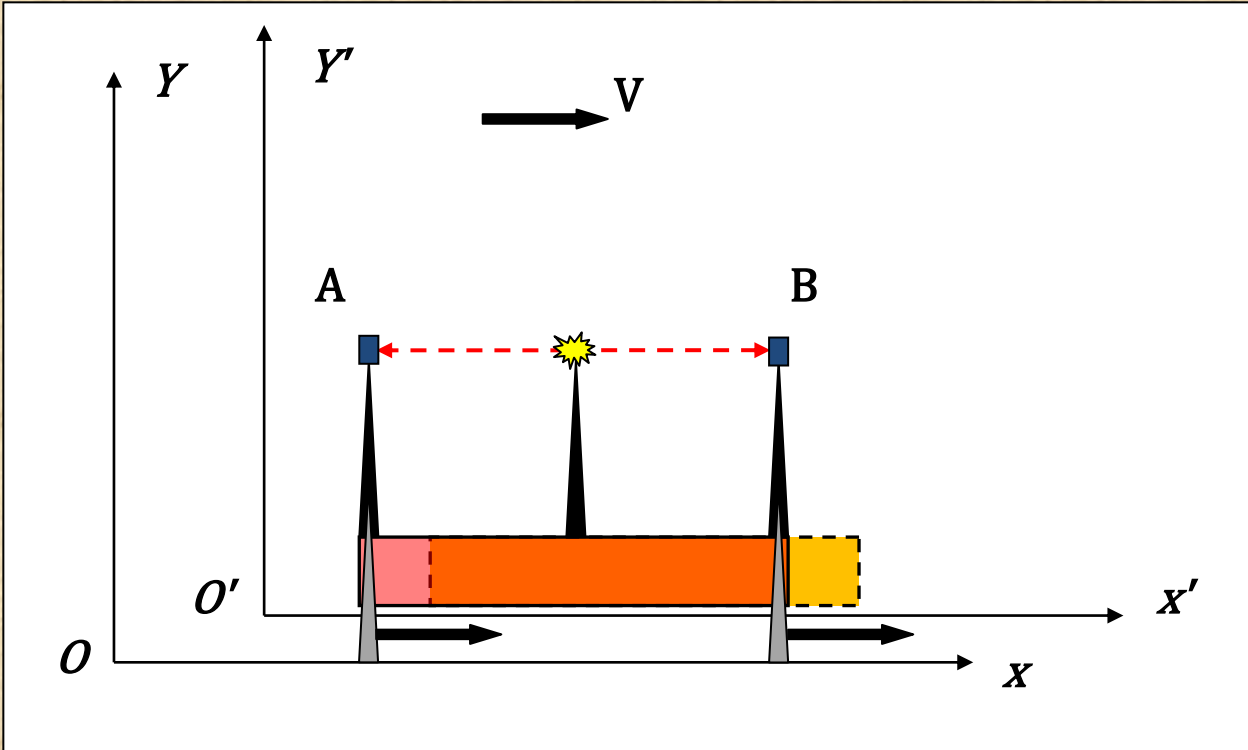
Начало процесса – показания часов t_1
Окончание процесса – показания часов $t_2 > t_1$
Длительность процесса - промежуток времени $\tau = t_2 - t_1$

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



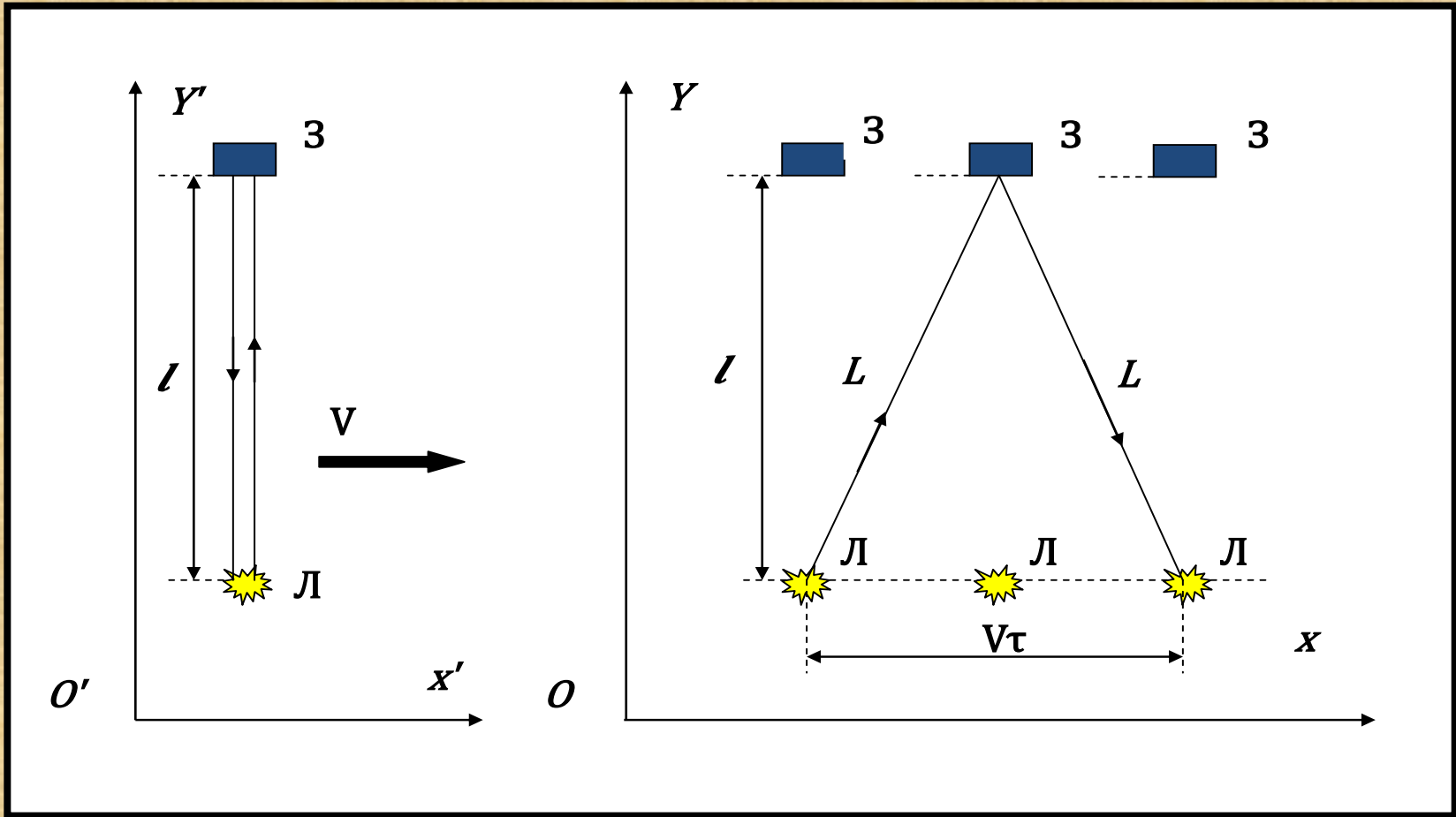
События в разных точках произошли
одновременно, если синхронизованные часы показывают
одинаковое время.

Относительность одновременности



$$t'_A = t'_B = L / 2c , t'_A - t'_B = 0$$
$$t_A = L / 2c + V , t_B = L / 2c - V , t_B - t_A = LV / c^2 - V^2$$

4. Замедление времени и сокращение длины



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

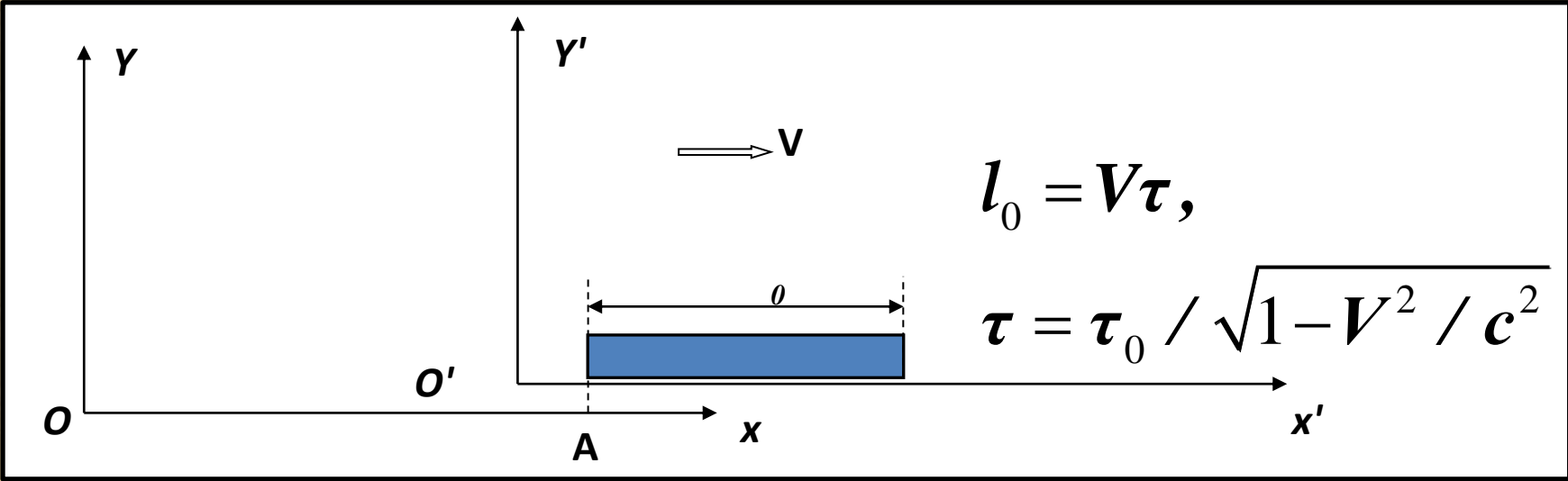
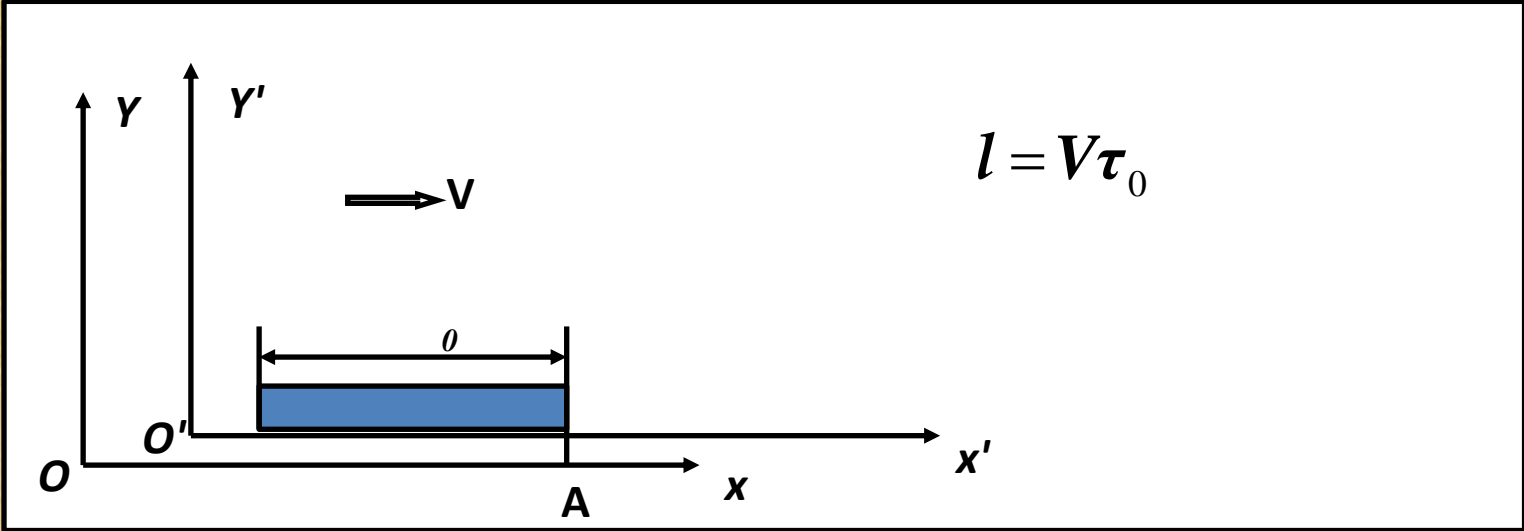
Замедление времени



Проверка эффекта замедления времени (1971 год)

- теория 184 нс
- эксперимент 203 нс

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

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

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

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

7. Примеры

7.1. 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.

7.2. 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 $< c$

3) Время встречи по собственным часам рассчитаем через интервал:

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

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

7.3. Близнецы

Близнецы Петр и Павел расстались в тот день, когда им исполнилось по 21 году. Петр Отправился в направлении оси Ox 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.

