

# Как распространяется свет?



Х. Гюйгенс  
1690 г.

Волновая теория света. Свет – волны в **эфире**, всепроникающей субстанции, заполняющей все пространство.

# Как распространяется свет?



О. Френель  
1818 г.

Световые волны поперечны.  
Какими свойствами должен обладать эфир?

# Как распространяется свет?



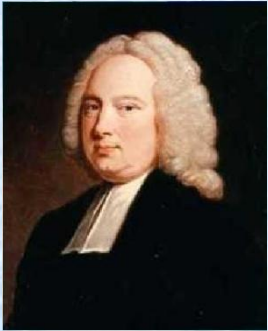
Эфир – общий носитель света,  
электричества, магнетизма, гравитации,...

Дж. Максвелл  
1864 г.

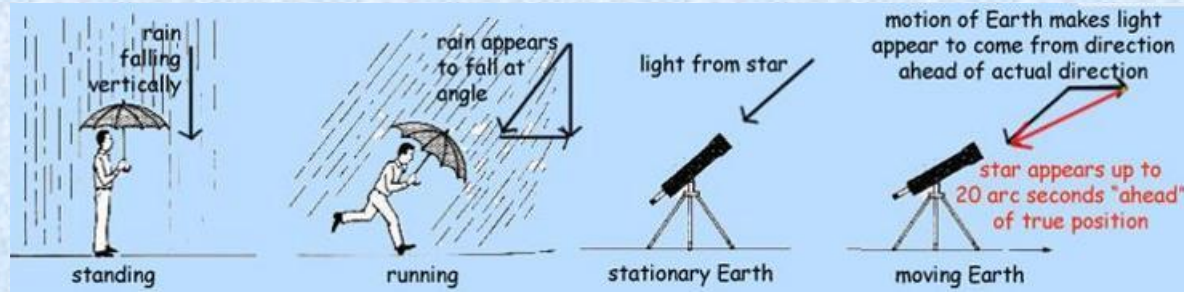
Из всех инерциальных систем выделяется  
абсолютная, неподвижная относительно  
«светоносного эфира»

Как сказывается движение тел на скорости света?

# Экспериментальные предпосылки



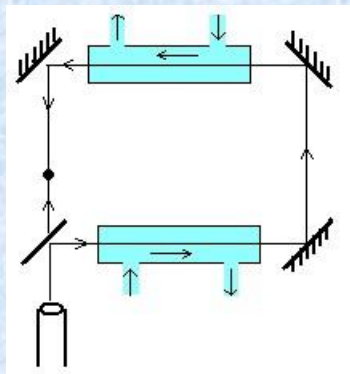
Дж. Брэдли  
1727 г.



Земля при своем движении не увлекает эфир



А. Физо  
1851 г.



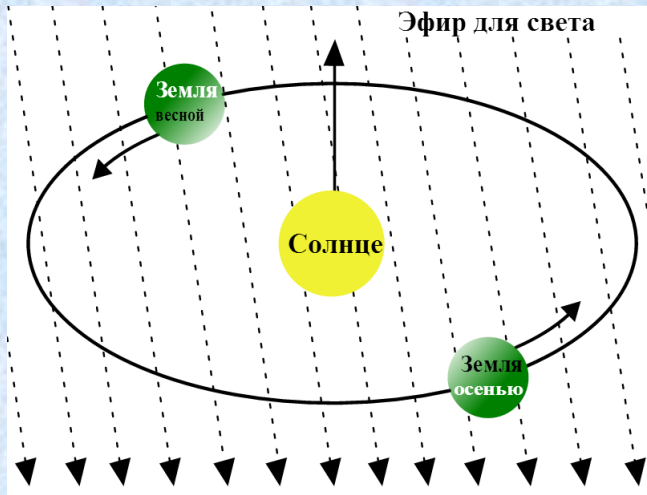
Скорость воды 7 м/с

Частичное увлечение эфира,

$$k = 1 - 1/n^2$$

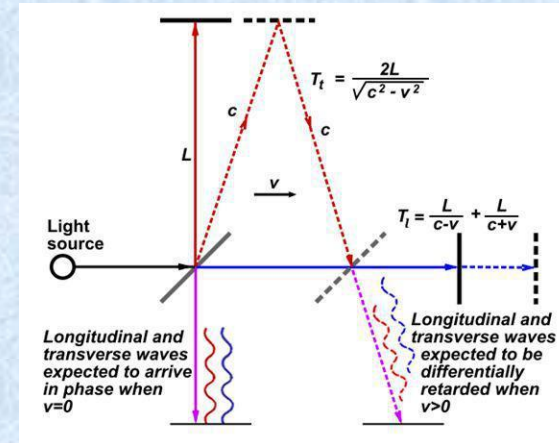
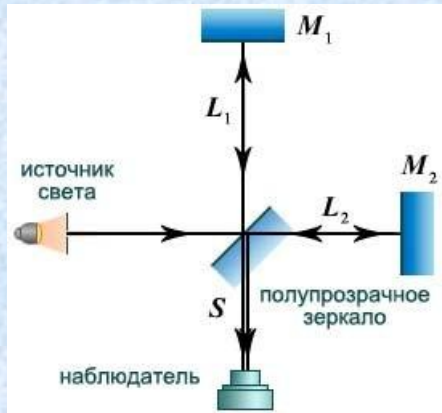


# Опыт Майкельсона



Эфирный ветер

# Опыт Майкельсона



$$t' = \frac{L}{c+v} + \frac{L}{c-v}$$

$$t'' = \frac{2L}{c} \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

При  $v = 3 \cdot 10^4$  м/с,  $t' - t'' = 3 \cdot 10^{-17}$  с

При  $T = 10^{-15}$  с смещение составит 0,03 полосы

# Опыт Майкельсона

1881 г. Наблюдаемое смещение несколько меньше теоретического

1887 г. (Майкельсон и Морли). Наблюдаемое смещение меньше  $1/20$  теоретического

.....

1958 г. (Колумбийский университет). Скорость света постоянна с точностью  $10^{-11}$ .

Эфирного ветра не существует!

# Постулаты Эйнштейна



*Здравый смысл – это сумма  
предубеждений, приобретенных до  
восемнадцатилетнего возраста.*

*А. Эйнштейн*

1905 г. «К электродинамике движущихся сред»



# Постулаты Эйнштейна

## I. Принцип относительности

**Все** физические явления протекают одинаковым образом во всех **инерциальных** системах отсчёта; все законы природы и уравнения, их описывающие, инвариантны, т.е. не меняются, при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой.

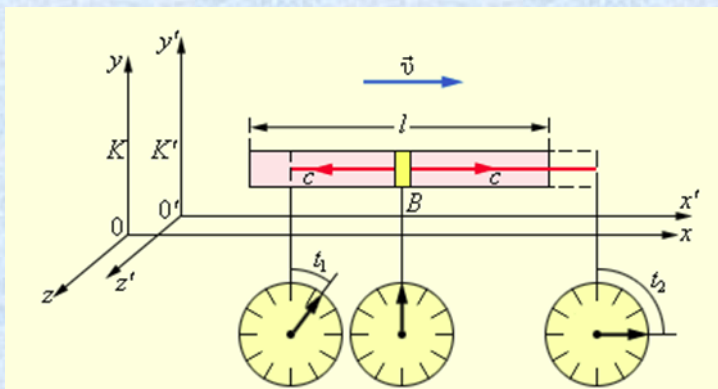
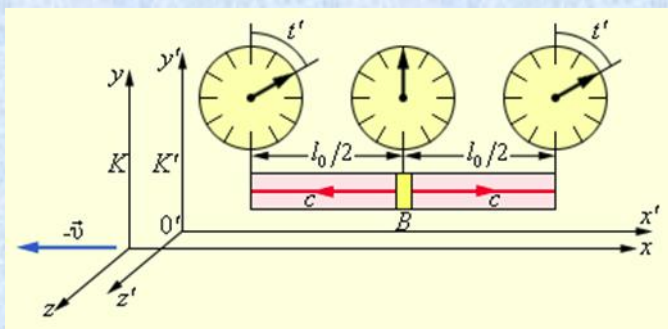
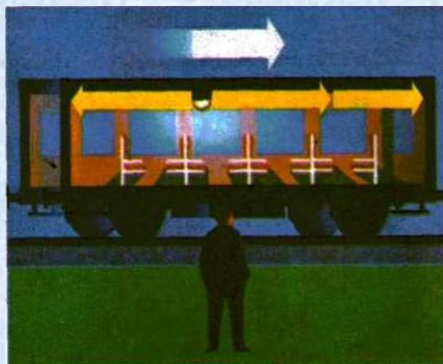
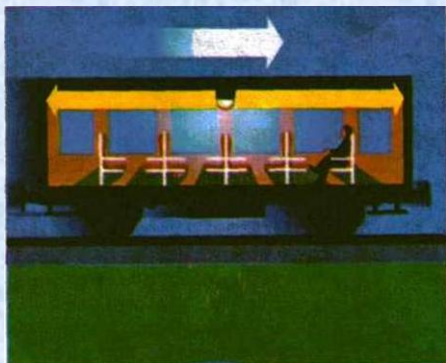
Все инерциальные системы отсчёта эквивалентны (неразличимы) по своим физическим свойствам; **никакими** опытами нельзя выделить одну из них как предпочтительную.

# Постулаты Эйнштейна

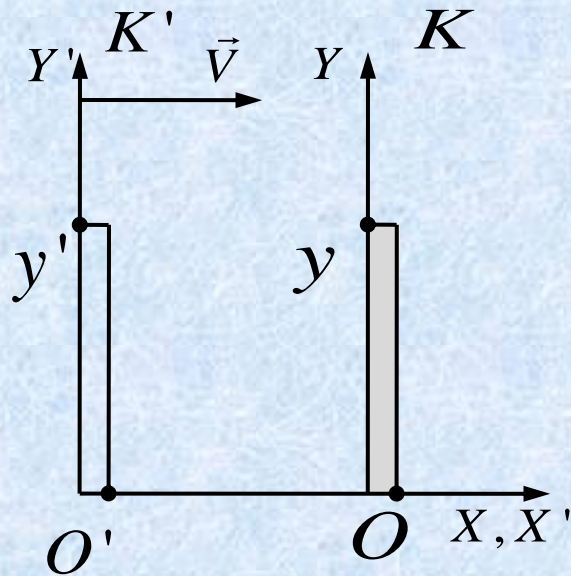
## II. Принцип постоянства скорости света

Скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчёта, не зависит от направления и от движения источника и приемника света.

# Одновременность событий



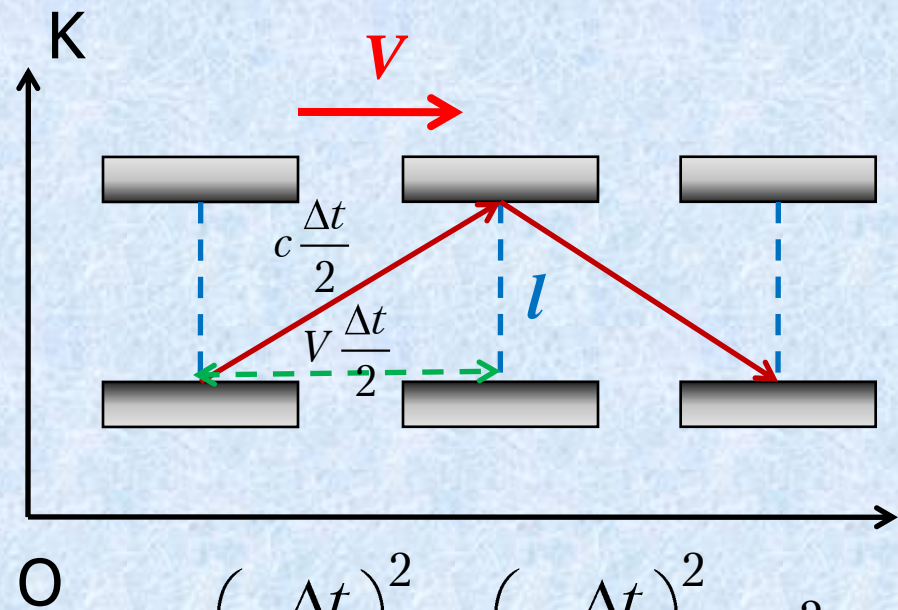
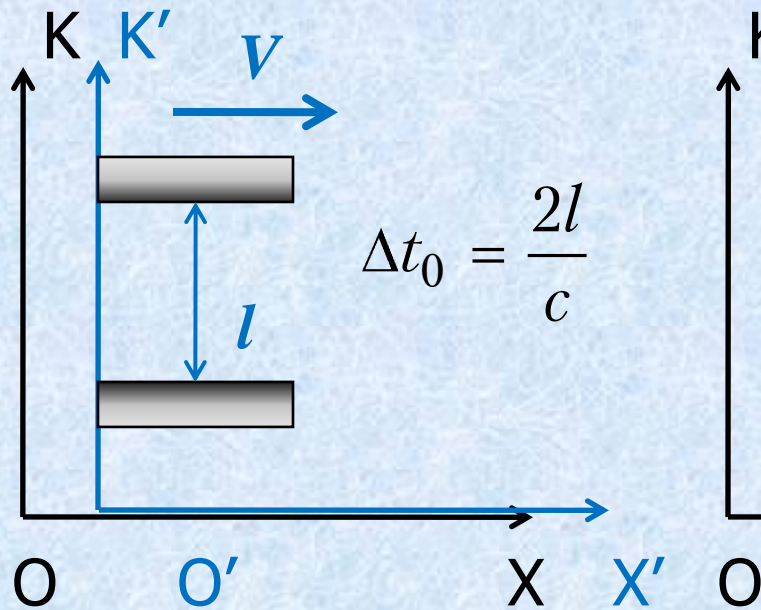
# Равенство поперечных размеров тел



В момент совпадения начала отсчета  $y = y'$  в соответствии с принципом относительности



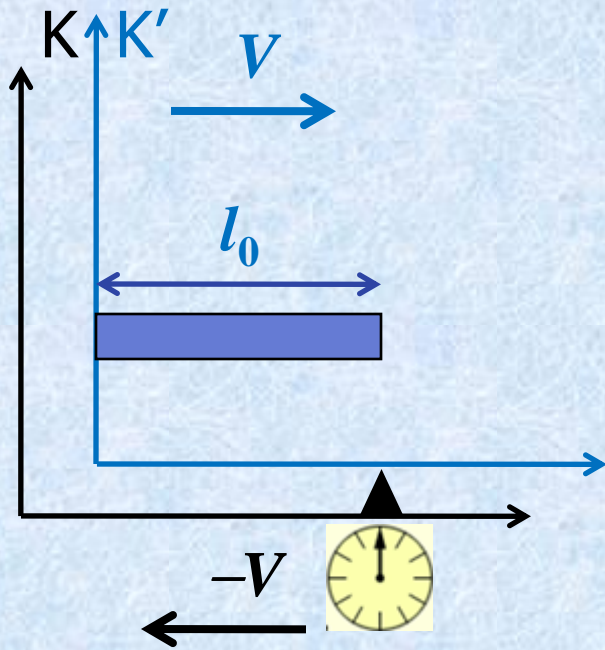
# Лоренцево замедление времени



$$\Delta t = \frac{2l}{c \sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}} = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}}$$

$$\left(c \frac{\Delta t}{2}\right)^2 = \left(V \frac{\Delta t}{2}\right)^2 + l^2$$

# Лоренцево сокращение длины

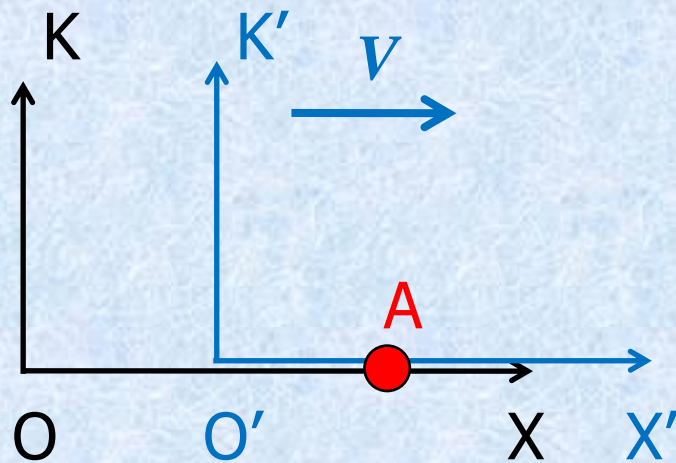


К-система:  $l = V \Delta t_0$

К'-система:  $l_0 = V \Delta t$

$$l = l_0 \frac{\Delta t_0}{\Delta t} = l_0 \sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}$$

# Преобразования Лоренца



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

В системе K:

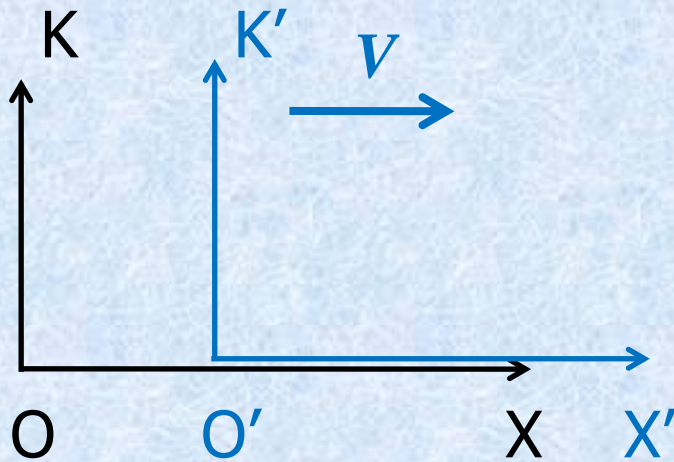
$$O'A = x - Vt = x'\sqrt{1 - \beta^2}$$

В системе K':

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

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = \frac{t - \frac{xV}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

# Преобразование скорости



$$v'_{x'} = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx'/dt}{dt'/dt}$$

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad t' = \frac{t - \frac{xV}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

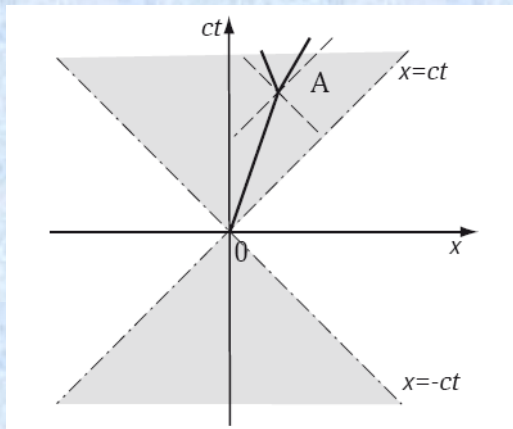
$$v'_{x'} = \frac{v_x - V}{1 - \frac{v_x V}{c^2}} \quad v'_{y'} = \frac{v_y \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \frac{v_x V}{c^2}}$$

Если  $v_x = c$ , то  $v'_{x'} = \frac{c - V}{1 - \frac{cV}{c^2}} = c$

Скорость любого сигнала или частицы не может быть больше  $c$



# Пространство Минковского



Пространство и время. Каждому событию соответствует точка в пространстве и времени. Это пространство называется «равным пространством».

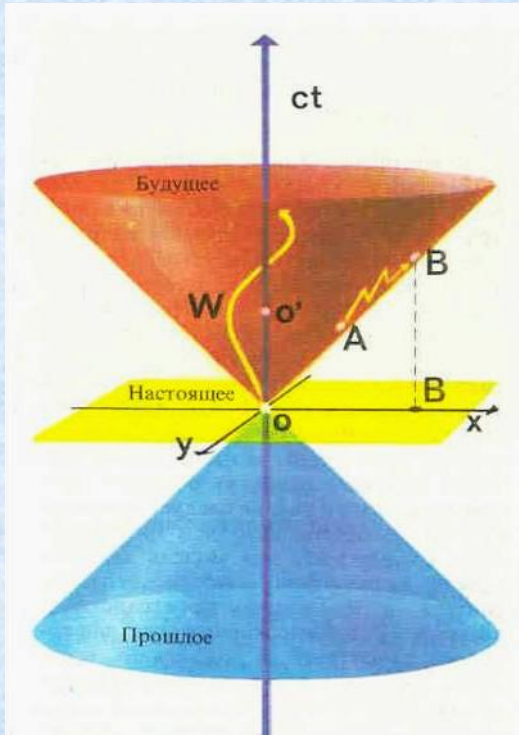
В пространстве Минковского, три координаты которой представляют собой декартовы координаты точки, а четвертая — координату  $ct$ .

Пространство Минковского псевдоэвклидово. «Расстояние» (**интервал**) между бесконечно близкими точками определяется как

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

Интервал между двумя событиями инвариантен относительно преобразований Лоренца (одинаков во всех системах отсчета)

# Интервал



$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

$ds^2 > 0$  – **времениподобный** интервал.

Существует система отсчета, в которой оба события произошли в одном месте. События **могут** быть причинно связаны.

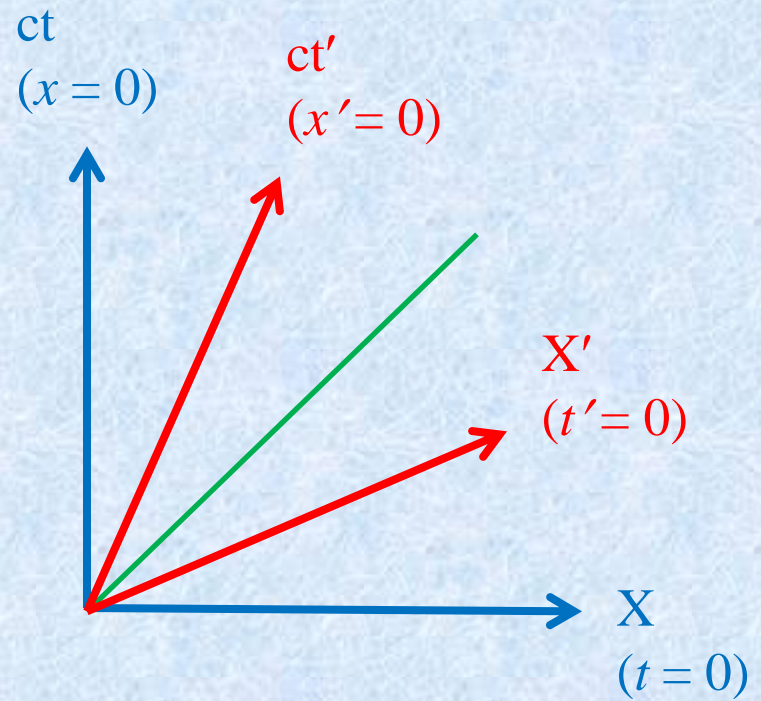
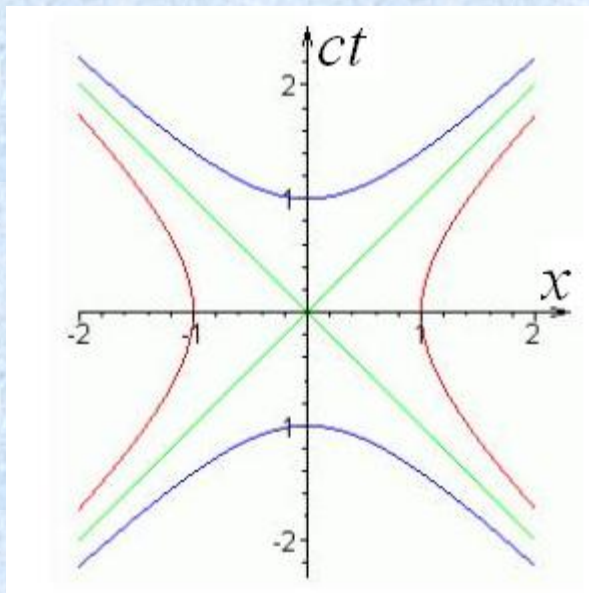
$ds^2 < 0$  – **пространственноподобный** интервал.

Существует система отсчета, в которой оба события произошли в одно время. События **не могут** быть причинно связаны.

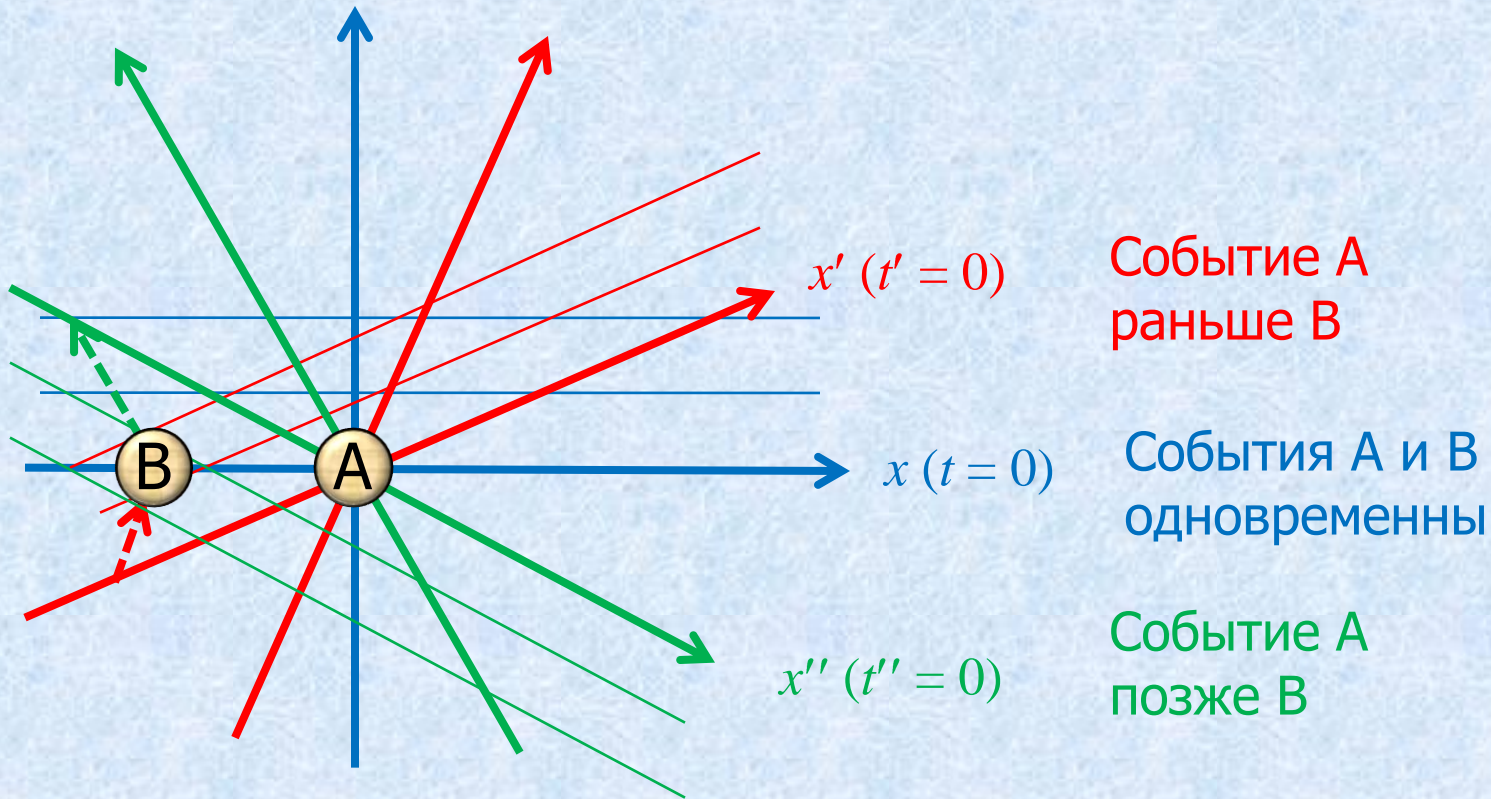
$ds^2 = 0$  – **светоподобный** интервал.

# Интервал

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2$$



# Относительность одновременности





# Парадокс близнецов

Неравенство треугольника С  
в геометрии Эвклида:

$$AB + BC \geq AC$$

Прямая AC имеет  
минимальную длину.



Небольшое  
«сглаживание» сторон  
треугольника не нарушает  
неравенства:

$$AB + BC \geq AC$$

Прямая AC имеет  
минимальную длину.



Неравенство треугольника  
в геометрии Минковского

$$AB + BC \leq AC$$

Прямая имеет  
максимальную «длину».  
Двигающиеся часы идут  
медленнее покоящихся.



Небольшое «сглаживание»  
сторон треугольника  
(движение с ускорением)  
не нарушает  
неравенства:

$$AB + BC \leq AC$$

Часы, двигающиеся с  
ускорением, идут  
медленнее, чем часы,  
двигающиеся с постоянной  
скоростью.

# Релятивистская динамика

Чтобы выполнялся закон сохранения импульса должно быть:

$$\vec{p} = m\vec{v} = \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$m_0$  – масса покоя. Масса движущейся частицы  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$

Основное уравнение релятивистской динамики

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}} \right)$$

Вектор ускорения может не совпадать по направлению с вектором силы

# Релятивистская энергия

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right) \cdot \vec{v} dt = \vec{F} \cdot \vec{v} dt \quad dA = dE_{\text{к}}$$

$$dE_{\text{к}} = \vec{v} \cdot dm \cdot \vec{v} + m d\vec{v} \cdot \vec{v} = v^2 dm + m v dv$$

$$E_{\text{к}} = m - m_0 \quad c^2 = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right)$$

Вопрос: Получить из выражения для релятивистской кинетической энергии классическую формулу

# Связь энергии и импульса

Полная энергия  $E = mc^2 = \underbrace{m_0c^2}_{\text{Энергия покоя}} + E_{\text{к}}$

$$E = mc^2 \quad p = mv$$

$$E^2 - p^2c^2 = m_0^2c^4$$

$$p = mv = \frac{Ev}{c^2}$$

Если  $m_0 = 0$  и  $v = c$ , то  $p = \frac{E}{c}$

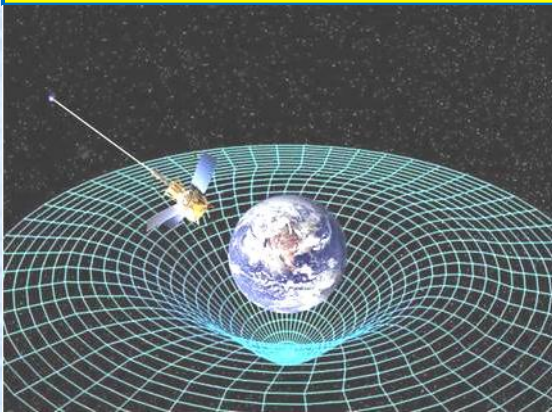
Только частицы с нулевой массой покоя могут двигаться со скоростью света (фотоны)



# Экспериментальные подтверждения теории относительности

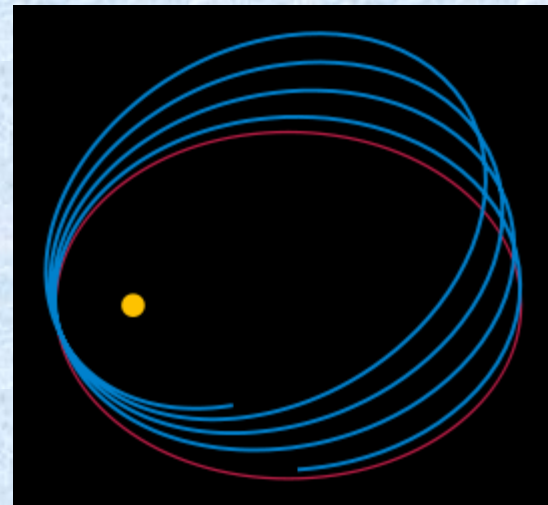
1916 г. ОТО. Эквивалентность сил инерции и тяготения

Законы природы одинаковы не только в инерциальных, но и в неинерциальных системах.



# Экспериментальные подтверждения теории относительности

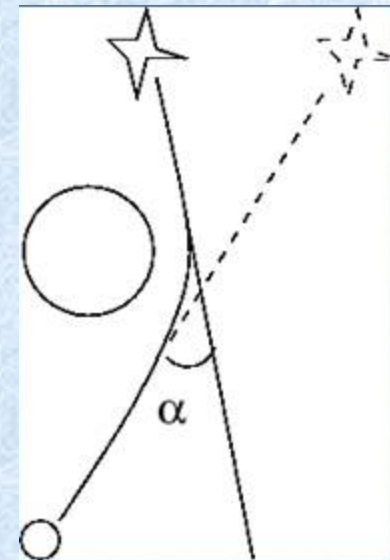
1859 г. Смещение перигелия  
Меркурия (43'' за столетие)



# Экспериментальные подтверждения теории относительности

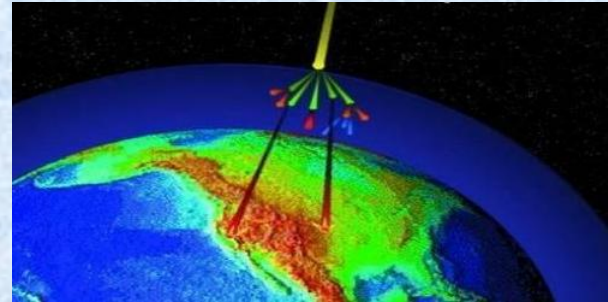
1919 г. Отклонение света  
гравитационным полем ( $0,3''$ )

1923 г. Красное смещение в спектре Солнца



# Экспериментальные подтверждения теории относительности

1936 г. Открытие мюона.  $\tau = 2$  мкс



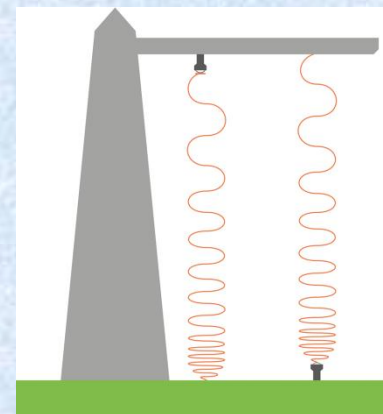


# Экспериментальные подтверждения теории относительности

1964 г. Эксперимент Паунда и Ребки



$$\frac{\delta\nu}{\nu} = -\frac{gH}{c^2} = -2,46 \cdot 10^{-15}$$



1971 г. Замедление времени в самолете

Разность показаний путешествовавших и остававшихся на месте часов, наносекунды				
При движении	Вычисленная (предсказанная)			Измеренная фактически
	Гравитационный вклад (ОТО)	Кинематический вклад (СТО)	Общий вклад (ОТО + СТО)	
На восток	+ 144 ± 14	− 184 ± 18	− 40 ± 23	− 59 ± 10
На запад	+ 179 ± 18	+ 96 ± 10	+ 275 ± 21	+ 273 ± 7