

ІІТМО

Лекция 9

Релятивистская физика

Ньютон, у нас проблемы

ІТМО



Однородность времени (существование единого мирового времени)

Пространство однородно и изотропно (физические законы не меняются - при смещении системы отсчета и изменении начала отсчета времени, при повороте осей системы отсчета)



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

$$\vec{a} = \vec{a}'$$

Ньютон, у нас проблемы

ІТМО

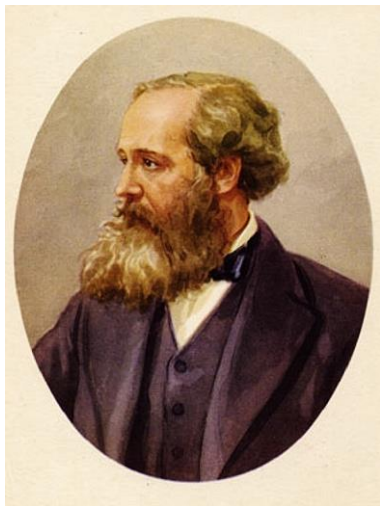
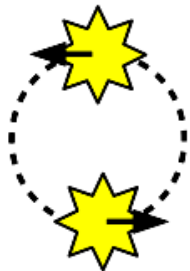


взаимодействие между любыми
физическими объектами,
находящимися на произвольном
расстоянии друг от друга,
осуществляется мгновенно;

масса не зависит от скорости движения;
все кинематические и динамические
переменные можно измерить
абсолютно точно

Ньютон, у нас проблемы

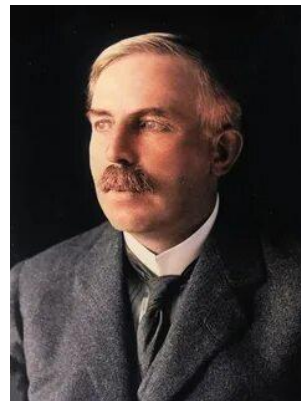
ИТМО



Альберт Майкельсон
(1852–1931)



Эдвард Морли
(1838–1923)





Обобщенный принцип
относительности Эйнштейна:

в физической системе, приведенной в состояние равномерного и прямолинейного движения относительно системы, условно называемой «покоящейся», для наблюдателя, движущегося вместе с системой, все процессы происходят точно так же, как и в покоящейся системе.



*Эквивалентная формулировка
принципа относительности:*

во всех инерциальных системах все физические законы имеют одинаковую форму. Это означает, что 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 скорости движения источника света или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчета

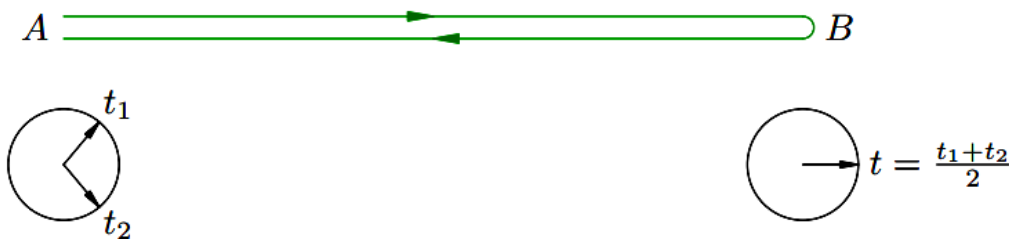


событие определяется как физическое явление, происходящее в какой-либо точке пространства в некоторый момент времени в избранной системе отсчета

Одновременность

Правило Эйнштейна.

Часы A и B идут синхронно, если в момент прихода сигнала в точку B показания часов B равны $(t_1 + t_2)/2$

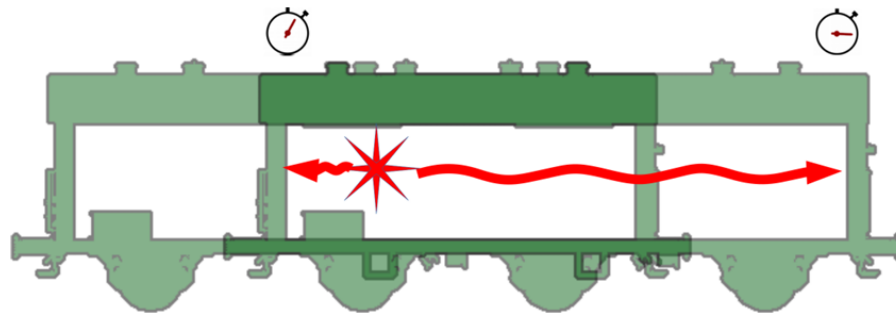
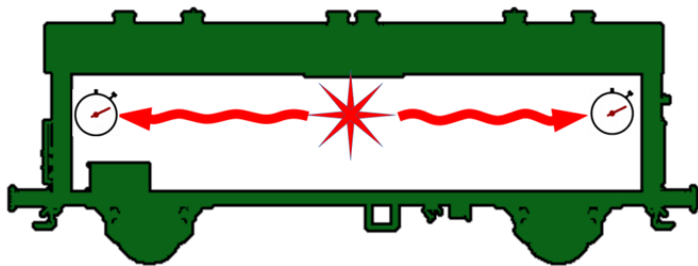


Произведём в середине отрезка AB вспышку света. По определению, часы A и B идут синхронно, если в моменты прихода света в точки A и B показания часов совпадают

Одновременность

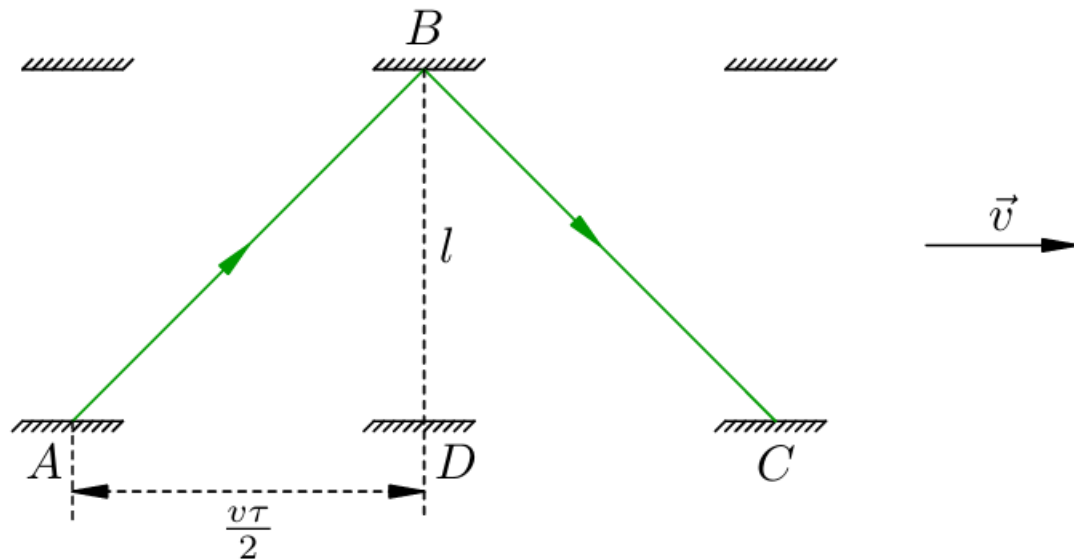
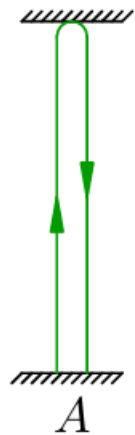
ИТМО

Два события, одновременные в одной системе отсчета, могут быть не одновременны в другой системе отсчета



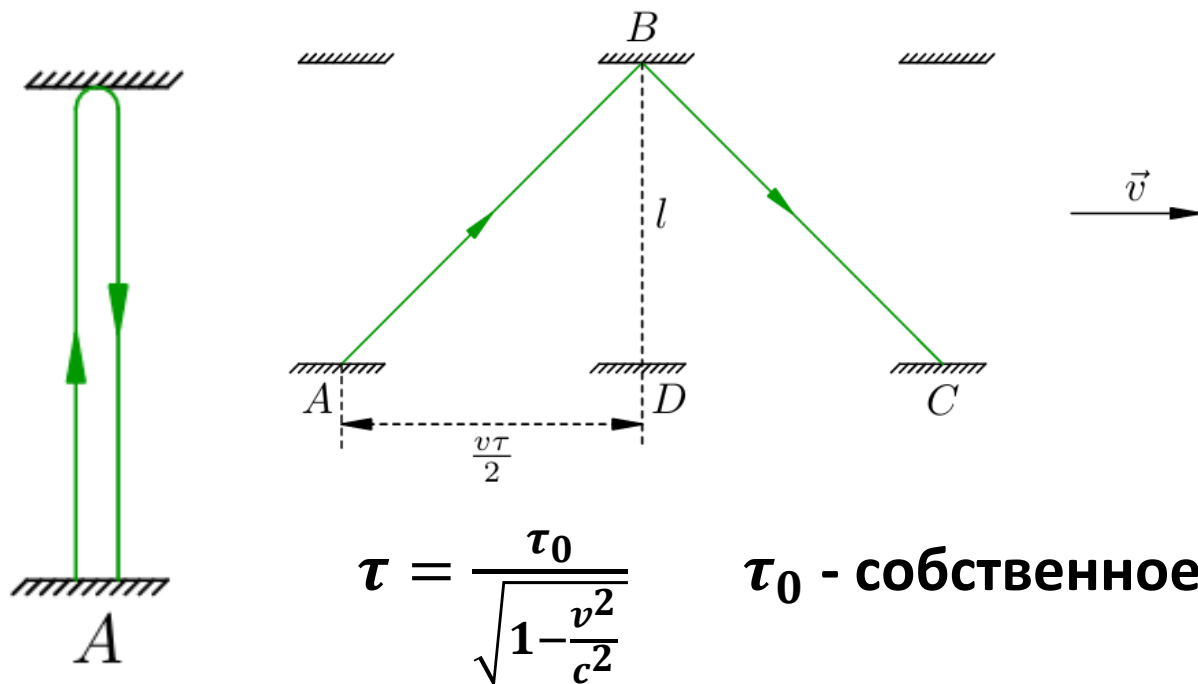
Одновременность

ІІТМО



Одновременность

$$2l = c\tau_0$$



$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

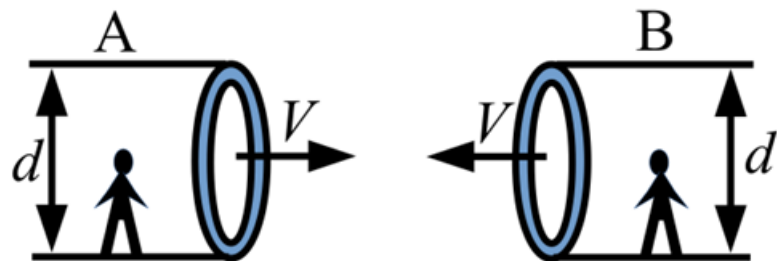
τ_0 - собственное время

$$\left(\frac{c\tau}{2}\right)^2 = \left(\frac{v\tau}{2}\right)^2 + \ell^2$$

$$(c\tau)^2 = (v\tau)^2 + (2\ell)^2$$

$$(c\tau)^2 = (v\tau)^2 + (c\tau_0)^2$$

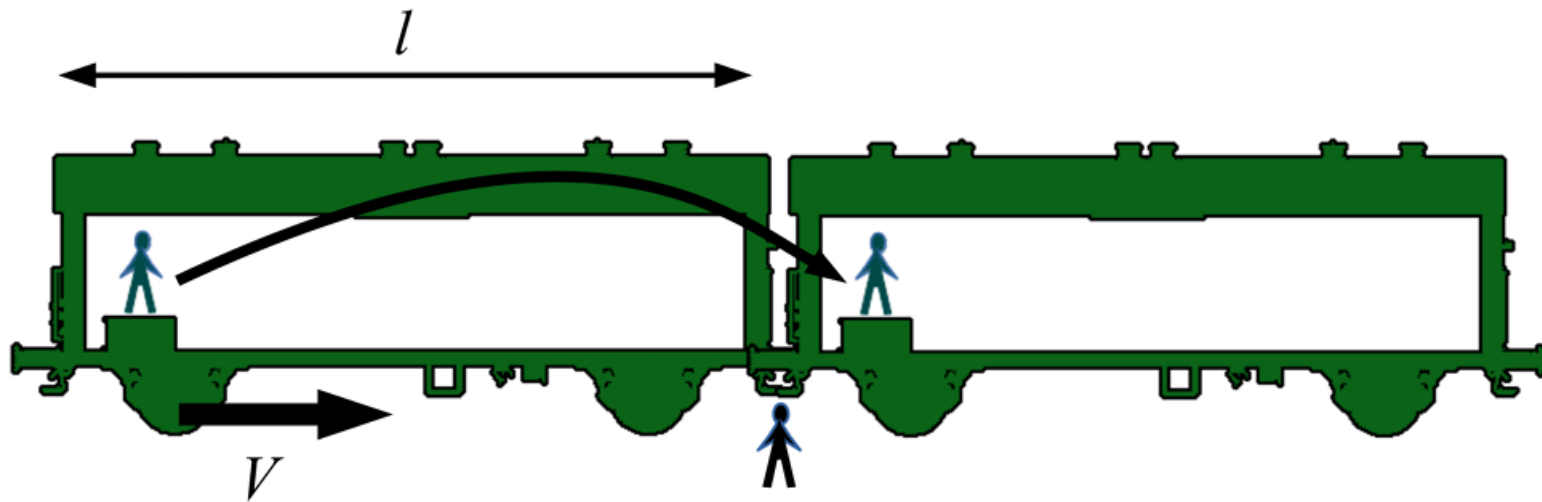
Относительность расстояний



поперечные размеры тела не могут меняться при движении наблюдателя

Относительность расстояний

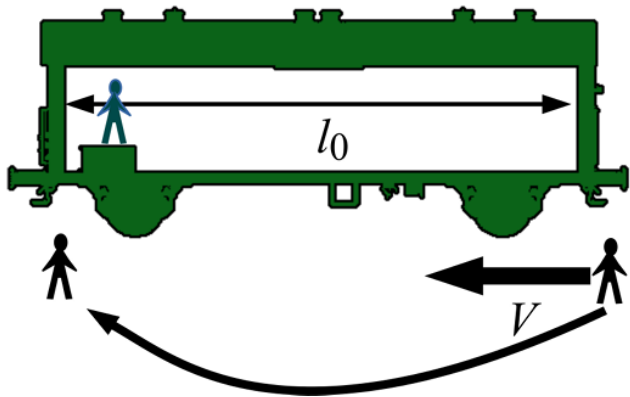
Мимо стрелочника сначала проехала передняя стенка вагона, а затем задняя



$$\tau_0 = \frac{\ell}{v}$$

Относительность расстояний

Для пассажира



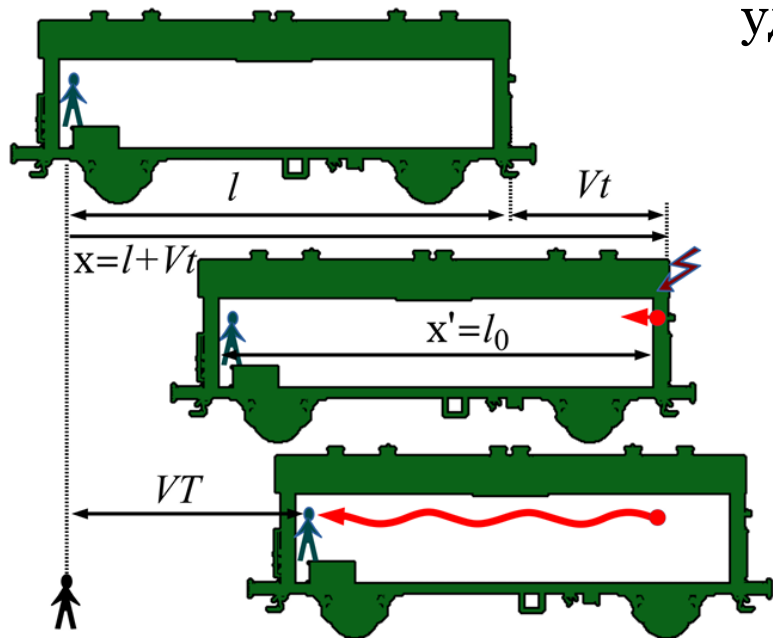
$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$l_0 = v\tau$$

$$\frac{l_0}{v} = \tau = \frac{l}{v\sqrt{1 - v^2/c^2}} \Rightarrow l = l_0\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Длина тела в системе отсчета, где тело неподвижно, называется **собственной длиной**. В других системах отсчета имеет место **сокращение размеров по сравнению с собственной длиной**.

Преобразования Лоренца



удар камня о переднюю стенку вагона

Для пассажира $x' = \ell_0$

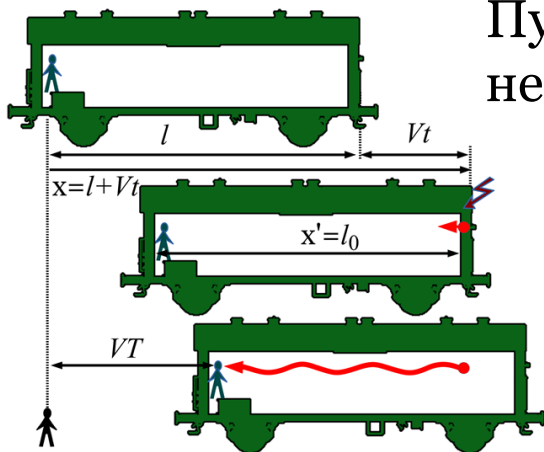
Для стрелочника $x = vt + \ell$

$$\ell = \ell_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$x = vt + x' \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Преобразования Лоренца



Пусть когда камень попал в переднюю стенку, от нее начал распространяться луч света

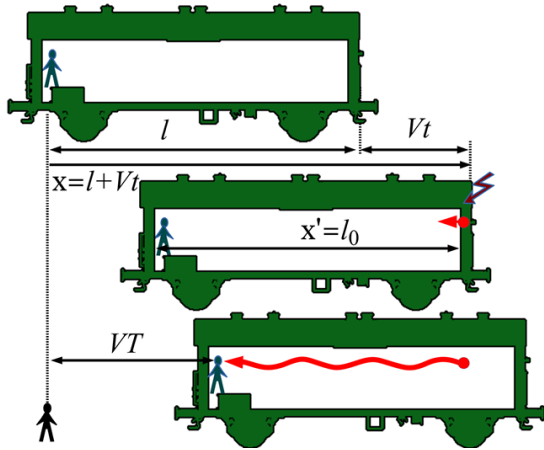
$$\text{Для пассажира } T_0 = t' + \frac{x'}{c}$$

$$\text{Для стрелочника } T = t + \frac{x - vT}{c}$$

$$T = \frac{t + x/c}{1 + v/c}$$

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \Rightarrow \frac{t + x/c}{1 + v/c} = \frac{t' + \frac{x'}{c}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Преобразования Лоренца



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

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

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

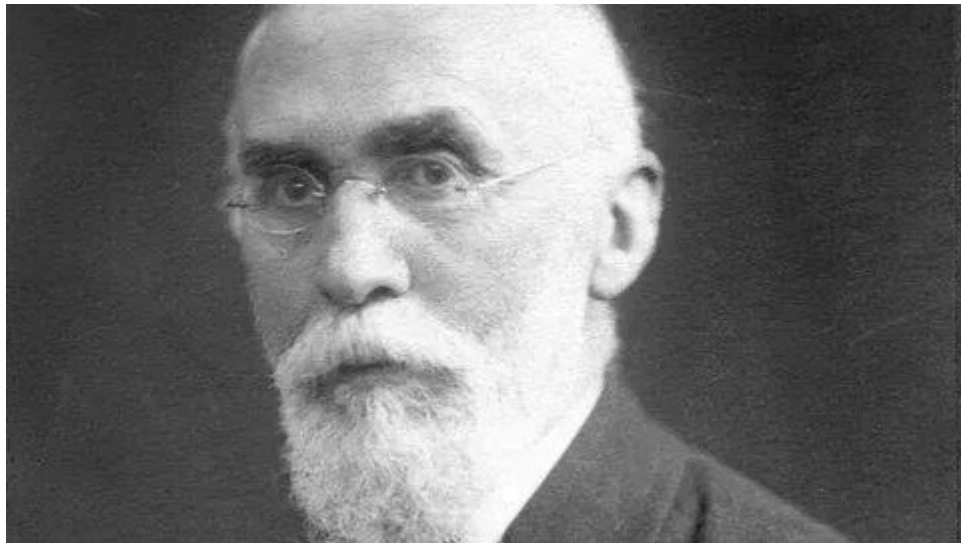
$$\frac{t'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{t + x/c}{1 + v/c} + \frac{vt/c - x/c}{1 - v^2/c^2}$$

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

Преобразования Лоренца

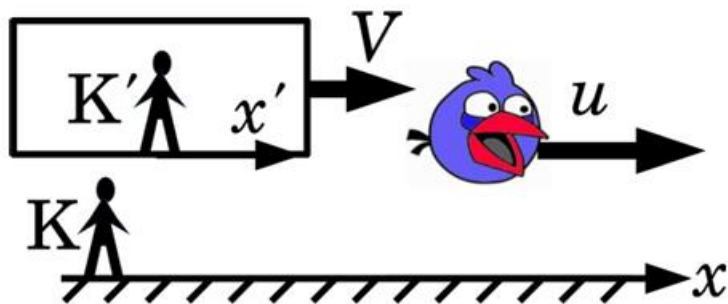
$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

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



$$x' \approx x - vt, \quad t' \approx t - \frac{x v^2}{v c^2} \approx t$$

Преобразование скоростей



$$u' = \frac{x'}{t'}, \quad u = \frac{x}{t}$$

$$u' = \frac{x'}{t'} = \frac{x - vt}{t - x \frac{v}{c^2}} = \frac{u - v}{1 - \frac{uv}{c^2}}$$

$$u = c \Rightarrow u' = \frac{c - v}{1 - \frac{cv}{c^2}} = \frac{c - v}{1 - \frac{v}{c}} = c \frac{1 - \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} = c$$

Уравнение движения

для тела массой m_0 , имеющего скорость $u(t)$ и ускорение $a = \frac{du}{dt}$

$$F = m_0 a = m_0 \frac{du}{dt} \quad \Leftrightarrow \quad F = \frac{dp}{dt} \quad (p = m_0 u)$$

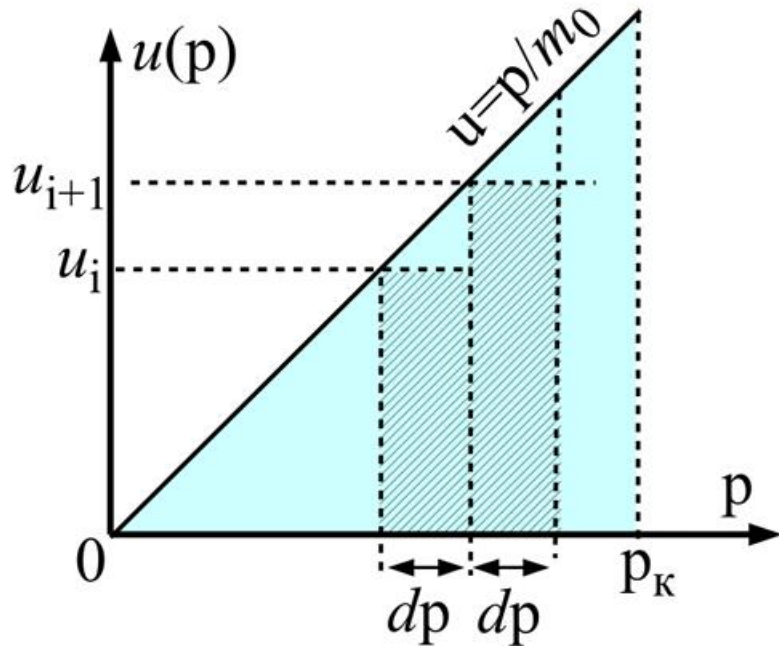
в СТО работать не может

$$F = \frac{dp}{dt} \quad \Leftrightarrow \quad p = \frac{m_0 u}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}, \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

p – релятивистский импульс, m – релятивистская масса

Кинетическая энергия

НЬЮТОН



$$dA = Fdx = Fudt = \frac{dp}{dt} u dt = u dp$$

$$dW_k = dA = u dp = \frac{p}{m_0} dp$$

$$W_k = \int_0^{p_k} u(p) dp = \int_0^{p_k} \frac{p}{m_0} dp = \frac{p_k^2}{2m_0} = \frac{m_0 v_k^2}{2}$$

Эйнштейн

$$p = \frac{m_0 u}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \Rightarrow p^2 - p^2 \frac{u^2}{c^2} = m_0^2 u^2 \Rightarrow p^2 c^2 - p^2 u^2 = m_0^2 c^2 u^2$$

$$u = \frac{pc}{\sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}}$$

$$W_k = \int_0^{p_k} u(p) dp = \int_0^{p_k} \frac{pc dp}{\sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}} = \frac{c}{2} \int_{m_0^2 c^2}^{p_k^2 + m_0^2 c^2} \frac{d(p^2 + m_0^2 c^2)}{\sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}}$$

$$W_k = \sqrt{p_k^2 c^2 + m_0^2 c^4} - m_0 c^2$$

У тела с импульсом p имеется релятивистская энергия

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4} = m c^2$$

$$\begin{aligned} W_k &= \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4} - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left(\sqrt{\frac{p^2}{m_0^2 c^2} + 1} - 1 \right) = \\ &= m_0 c^2 \left(\sqrt{\frac{m_0^2 u^2}{m_0^2 c^2 (1 - \frac{u^2}{c^2})} + 1} - 1 \right) = m_0 c^2 \left(\sqrt{\frac{u^2}{c^2 - u^2} + 1} - 1 \right) \\ &= m_0 c^2 \left(\sqrt{\frac{c^2}{c^2 - u^2}} - 1 \right) = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} - 1 \right) \end{aligned}$$

$$W_k = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} - 1 \right)$$

$$u \ll c$$

$$(1 + x)^\alpha \approx 1 + \alpha x \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \left(1 - \frac{u^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{1}{2} \frac{u^2}{c^2}$$

$$W_k = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} - 1 \right) \approx m_0 c^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{u^2}{c^2} - 1 \right) = \frac{m_0 u^2}{2}$$

Пространственно-временной интервал

$$s = \sqrt{c^2 t^2 - \ell^2}$$

Если $s^2 < 0$, говорят, что интервал между событиями пространственноподобный. Это означает, что существует система отсчета, в которой эти события происходят одновременно на некотором расстоянии друг от друга.

Если $s^2 > 0$, говорят, что интервал между событиями времениподобный. Это означает, что существует система отсчета, в которой эти события происходят в одной и той же точке в разные моменты времени.



Спасибо
за внимание!

it's **MO** *re than a*
UNIVERSITY

nnkhvastunov@itmo.ru