

Специальная теория относительности

Кинематика СТО

ТРУДНОСТИ ДОРЕЛЯТИВИСТКОЙ ФИЗИКИ. ОПЫТ МАЙКЕЛЬСОНА

Представления механики Ньютона подтвердились многочисленными экспериментами по изучению движения тел со скоростями $v \ll c$.

Принцип относительности Галилея

- Распространяется ли принцип относительности Галилея и на немеханические явления?

Распространение света:

Свет – это электромагнитная волна (распространение в среде).

ЭФИР заполняет все пространство и пронизывает все тела, абсолютно неподвижен и не увлекается телами

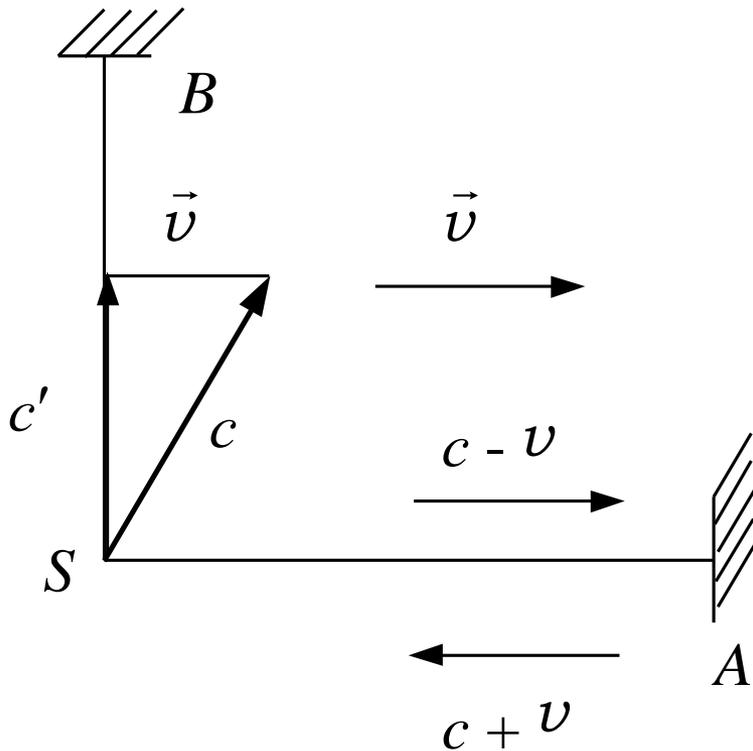
- Можно ли с помощью немеханических явлений различать инерциальные системы отсчёта и выделить главную, **абсолютную систему отсчёта**?

ЭФИР - абсолютная и неподвижная система отсчёта?

ТРУДНОСТИ ДОРЕЛЯТИВИСТКОЙ ФИЗИКИ. ОПЫТ МАЙКЕЛЬСОНА

Цель опыта Майкельсона - обнаружить движение Земли относительно эфира.

Схема установки:



$$t_{\parallel} = \frac{l}{c-v} + \frac{l}{c+v} = \frac{2l}{c} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

$$c' = \sqrt{c^2 - v^2}$$

$$t_{\perp} = \frac{2l}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2l}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Должно быть: $t_{\parallel} \neq t_{\perp}$

ТРУДНОСТИ ДОРЕЛЯТИВИСТКОЙ ФИЗИКИ. ОПЫТ МАЙКЕЛЬСОНА

$$t_{\parallel} = t_{\perp}$$

Отрицательный результат опыта Майкельсона показал, что

1. **Эфира** (особой среды, которая могла бы быть принята в качестве абсолютной системы отсчёта), **не существует**.
2. К скорости света нельзя применить классический закон сложения скоростей. **Скорость света не зависит от движения источника света.**

Специальная теория относительности

Постулаты Эйнштейна

ПОСТУЛАТЫ ЭЙНШТЕЙНА

В основе специальной теории относительности (релятивистская теория) лежат постулаты Эйнштейна.

- 1. Принцип относительности:** никакие опыты (механические, электрические, оптические), проведённые внутри данной инерциальной системы отсчёта, не дают возможности обнаружить покоится ли эта система или движется равномерно и прямолинейно. Все законы природы инвариантны, т.е. не меняются при переходе от одной системы отсчёта к другой.

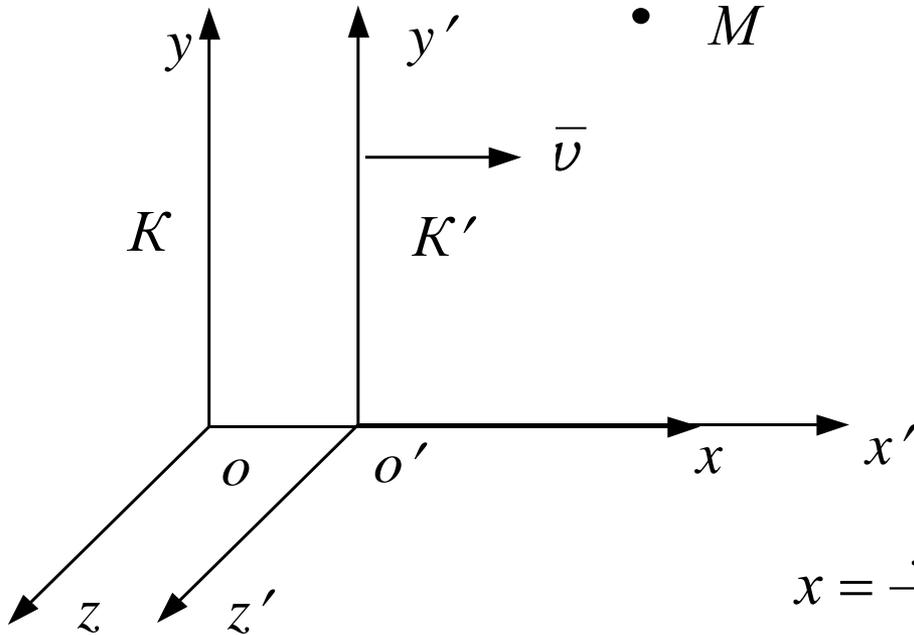
- 2. Независимость скорости света от скорости источника:** скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчёта.

Специальная теория относительности

Преобразования Лоренца

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛОРЕНЦА

Рассмотрим две инерциальные системы отсчёта K и K' .



В момент начала отсчета времени $O=O'$.
Пусть в момент времени t' в системе K' в точке M с координатами x', y', z' произошло некоторое событие.

Координаты x, y, z и момент времени t этого события в системе K ?

Обратные преобразования $K' \rightarrow K$:

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

Прямые преобразования $K \rightarrow K'$:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad y' = y \quad t' = \frac{t - x \cdot v/c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$z' = z$$

Специальная теория относительности

Следствия из преобразований Лоренца

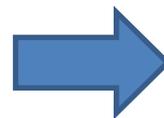
1. Длительность событий в разных системах отчета

1. ДЛИТЕЛЬНОСТЬ СОБЫТИЙ В РАЗНЫХ СИСТЕМАХ ОТЧЕТА

Пусть в системе K' в точке с координатой x' произошло некоторое событие, длительность которого $\tau'_0 = t'_2 - t'_1$

В системе K : $\tau = t_2 - t_1$

$$t_1 = \frac{t'_1 + vx'/c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad t_2 = \frac{t'_2 + vx'/c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



$$\tau = \frac{\tau'_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

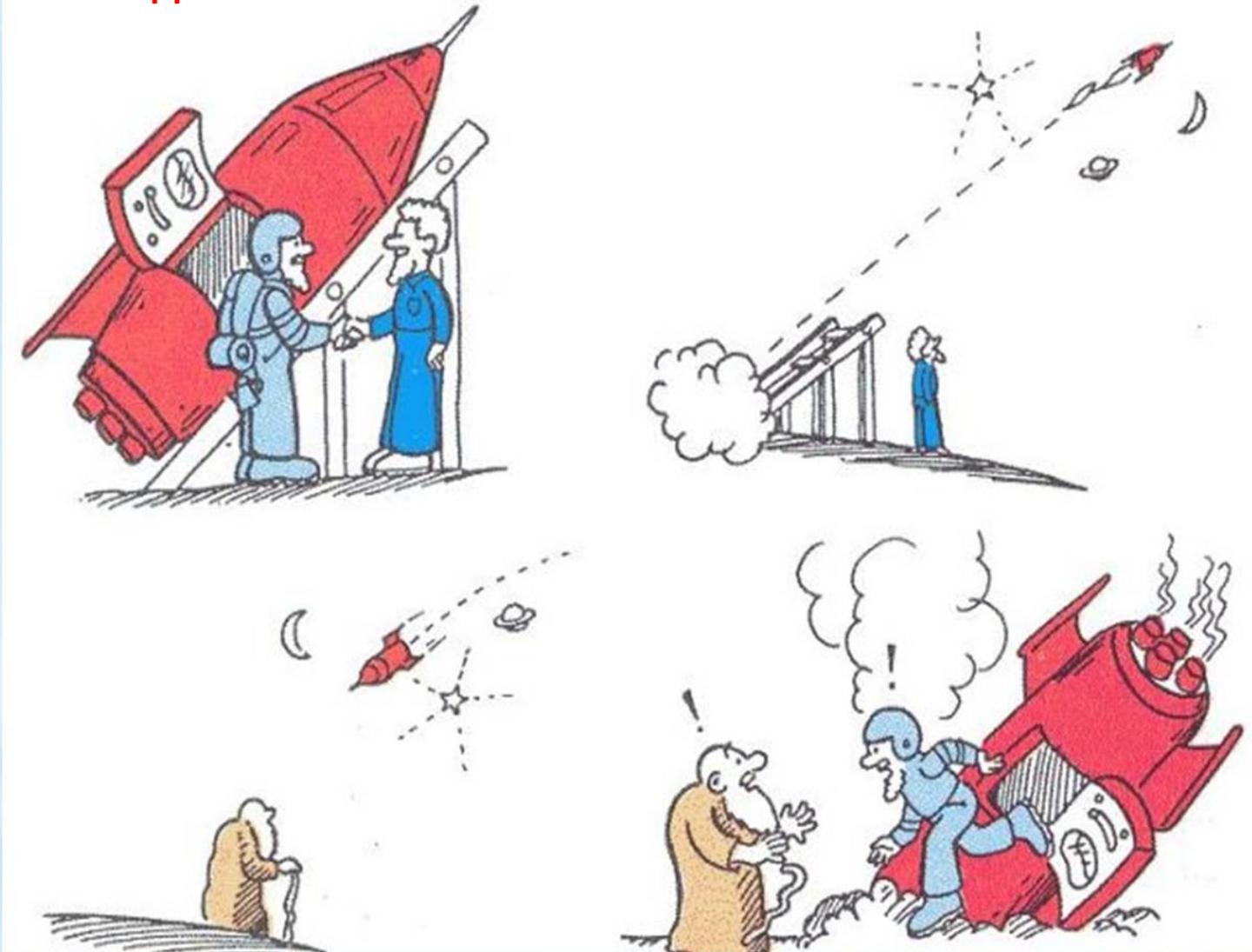
Длительность одного и того же события в разных инерциальных системах отсчёта **разная**. В K - системе его длительность больше:

$$\tau > \tau'_0$$

Движущиеся часы идут медленнее покоящихся.

Эффект замедления хода часов проверен на современных ускорителях.

1. ДЛИТЕЛЬНОСТЬ СОБЫТИЙ В РАЗНЫХ СИСТЕМАХ ОТЧЕТА



ПАРАДОКС БЛИЗНЕЦОВ

Специальная теория относительности

Следствия из преобразований Лоренца

2. Длина тел в разных системах отчета

2. ДЛИНА ТЕЛ В РАЗНЫХ СИСТЕМАХ ОТЧЕТА

Рассмотрим стержень, расположенный вдоль оси x' и покоящийся относительно K' - системы. Длина стержня в системе K' будет: $l'_0 = x'_2 - x'_1$

Длина стержня в системе K , относительно которой он движется со скоростью v равна $l = x_2 - x_1$

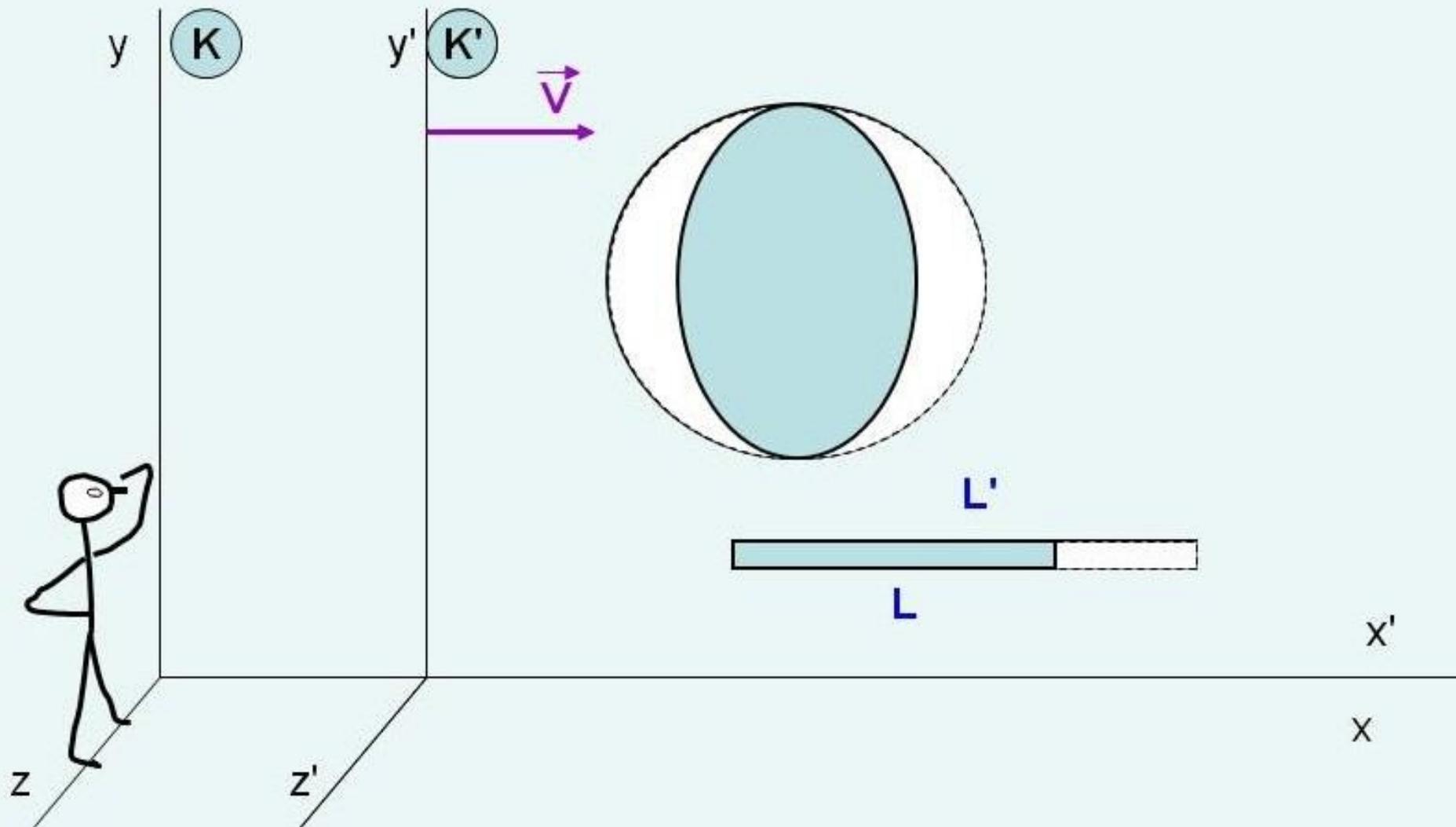
$$l'_0 = x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{l}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$l = l'_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Длина стержня, измеренная в системе, относительно которой он движется, меньше длины, измеренной в системе, относительно которой он покоится:

$$l < l'_0$$

2. ДЛИНА ТЕЛ В РАЗНЫХ СИСТЕМАХ ОТЧЕТА



ЛОРЕНЦЕВО СОКРАЩЕНИЕ ДЛИНЫ

Специальная теория относительности

Следствия из преобразований Лоренца

3. Релятивистское правило сложения скоростей

3. РЕЛЯТИВИСТСКОЕ ПРАВИЛО СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ

Пусть точка M движется в системе K' со скоростью u' по направлению оси x' .

$$u' = \frac{dx'}{dt'}$$

$$u = \frac{dx}{dt}$$

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



$$dx = \frac{dx' + v \cdot dt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}};$$

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



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

$$u = \frac{dx' + v \cdot dt'}{dt' + v \cdot dx'/c^2} = \frac{\frac{dx'}{dt'} + v}{1 + \frac{v}{c^2} \frac{dx'}{dt'}}$$



$$u = \frac{u' + v}{1 + v \cdot u'/c^2}$$

3. РЕЛЯТИВИСТСКОЕ ПРАВИЛО СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ

$$u = \frac{u' + v}{1 + v \cdot u' / c^2}$$

Если скорости v и u' малы по сравнению со скоростью c , то релятивистское правило сложения скоростей перейдет в правило сложения скоростей в классической механике (Галилея):

$$u = u' + v$$

Релятивистское правило сложения скоростей подчиняется второму постулату Эйнштейна. Если $u' = c$, то

$$u = \frac{c + v}{1 + c \cdot v / c} = c$$

Скорость света – предельная скорость.

Динамика теории относительности

ОСНОВНОЙ ЗАКОН РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ДИНАМИКИ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

ОСНОВНОЙ ЗАКОН РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ДИНАМИКИ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

В теории относительности масса движущихся частиц зависит от их скорости:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

m_0 -- масса покоя частицы, т.е. масса, измеренная в той инерциальной системе отсчёта, относительно которой частица покоится

$$\vec{P} = m\vec{v} = \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

релятивистский импульс

В релятивистской механике выполняется закон сохранения релятивистского импульса

ОСНОВНОЙ ЗАКОН РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ДИНАМИКИ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

Основной закон классической динамики (второй закон Ньютона) гласит:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F} \qquad \vec{P} = m\vec{v}$$

Основной закон релятивистской динамики:

$$v \ll c$$

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

Кинетическая энергия релятивистской частицы

1). Приращение кинетической энергии материальной точки на элементарном перемещении равно работе силы на этом перемещении:

$$dE_k = \vec{F} \cdot d\vec{r} = \vec{F} \cdot \vec{v} dt$$

2). Поскольку

$$\vec{F} dt = d(m\vec{v}) = dm \cdot \vec{v} + m d\vec{v}$$

(где m – релятивистская масса) , то

$$dE_k = \vec{v} (dm \cdot \vec{v} + m d\vec{v}) = v^2 dm + m \cdot v d v (*)$$

$$\vec{v} d\vec{v} = v dv$$

3). Для упрощения (*):

Кинетическая энергия релятивистской частицы

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \longrightarrow \quad m^2 = \frac{m_0^2}{1 - v^2/c^2}$$

$$m^2 \left(1 - v^2/c^2\right) = m_0^2 \quad \longrightarrow \quad m^2 c^2 - v^2 m^2 = m_0^2 c^2$$

$$m^2 c^2 = m_0^2 c^2 + v^2 m^2$$

Найдём дифференциал этого выражения: m_0 и c – постоянные величины

$$2mc^2 dm = 2mv^2 dm + 2m^2 v dv \quad \setminus 2m$$

$$c^2 dm = v^2 dm + mv dv$$

Кинетическая энергия релятивистской частицы

$$c^2 dm = v^2 dm + m v dv$$

$$dE_k = v^2 dm + m v dv$$



$$dE_k = c^2 dm$$

Т.о. приращение кинетической энергии частицы пропорционально приращению её релятивистской массы

$$E_k = \int dE_k = \int_{m_0}^m c^2 dm = (m - m_0)c^2$$

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



Релятивистская кинетическая энергия частицы

Закон взаимосвязи массы и энергии

Эйнштейн пришёл к выводу, что масса тела будет вырастать не только при сообщении ему кинетической энергии, но и при увеличении общего запаса энергии (кинетической, электрической, тепловой, химической и т. д.)

$$E = mc^2$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

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

$$E = m_0 c^2 + E_k$$

Закон взаимосвязи массы и энергии

$$E = m_0 c^2 + E_k$$

где m_0 – масса покоя тела, E_k – его кинетическая энергия

Если $(E_k = 0)$

$$E_0 = m_0 c^2$$

-- энергия покоя

Масса тела – мера энергосодержания тела

Даже покоящееся тело, согласно теории относительности, обладает запасом энергии – **энергией покоя**.