Специальная теория относительности

Она же релятивистская механика

Классическая механика и принцип относительности

ИСО ⇒ 1 закон Ньютона уравнивает все СО, движущиеся прямолинейно и равномерно относительно ∀ ИСО = принцип относительности Галилея.

Для теоретиков он звучит так:

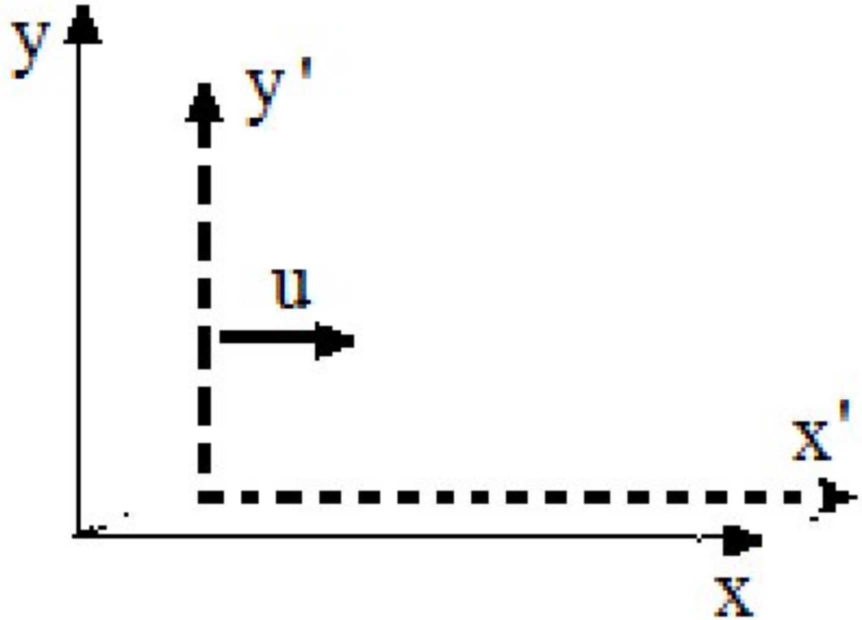
Основные законы физики формулируются одинаково для всех СО, которые равномерно и прямолинейно движутся друг относительно друга.

Экспериментаторы понимают его так:

Нельзя, наблюдая за физическими явлениями в ИСО, обнаружить абсолютное движение или покой этой СО.

Преобразования Галилея

Необходимый элемент классической механики:



$x' = x - u\,t; \quad y' = y; \quad z' = z$

Подразумевается: $t' = t$

(время одно и то же во всех точках любых ИСО).

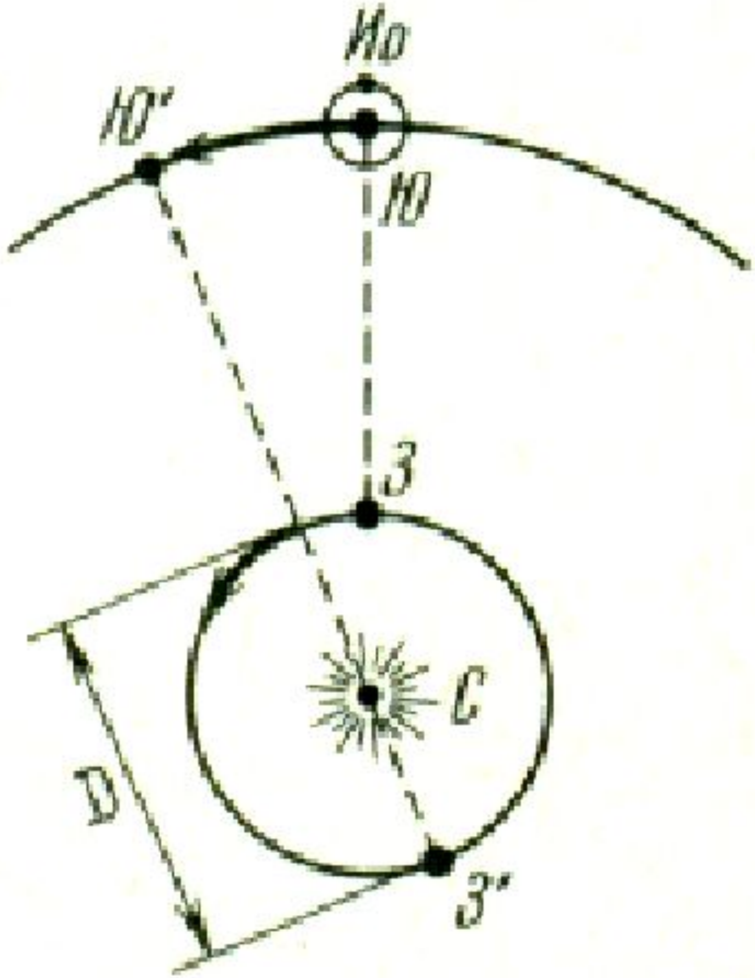
Для скоростей и ускорений получаются соотношения:

$v_x' = v_x - u; \quad v_y' = v_y; \quad v_z' = v_z$

$w_x' = w_x; \quad w_y' = w_y; \quad w_z' = w_z$

Но Максвелл: в $\forall$ ИСО скорость ЭМВ = скорости света $\Rightarrow$ $c - u = c$

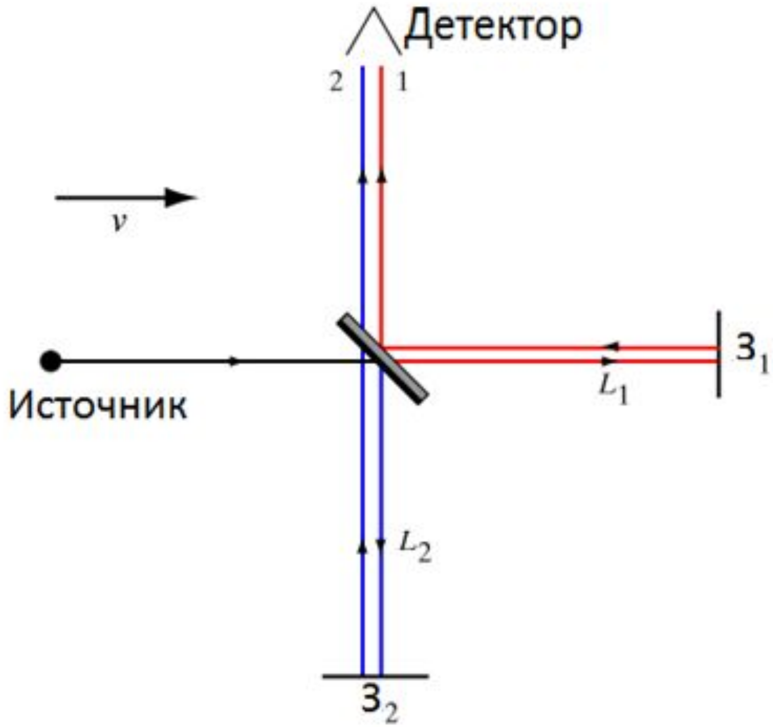
Скорость света



Оле Ремер (XVII век)
Наблюдение за спутниками Юпитера:
время появления Ио из-за диска Юпитера в двух конфигурациях планет отличается на 20 мин. = = время прохождения светом диаметра орбиты Земли.

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Опыт Майкельсона



Скорость движения Земли вокруг Солнца v = 30 км/с

$L_1 = L_2$

На участке L_1 направо

$\lambda = (c - v)/\nu_0$, и уложится $L_1 \nu_0/(c - v)$ длин волн

На участке L_1 налево

$\lambda = (c + v)/\nu_0$, и уложится $L_1 \nu_0/(c + v)$ длин волн

Полное их число:

$$L_1 \nu_0/(c - v) + L_1 \nu_0/(c + v) = 2 L_1 \nu_0 c/(c^2 - v^2)$$

Не обнаружена разность хода $\Rightarrow$ движение источника не влияет на скорость света: c = invar

Выводы из опыта Майкельсона

Результат Майкельсона $\Rightarrow$ 2 совершенно противоположных вывода:

- принцип относительности не верен, т.к. не действует правило сложения скоростей, которое из него следует;
- принцип относительности верен, т.к. измерения скорости света не позволяют выделить какую-либо ИСО.

В связи с этим возникли 2 проблемы:

- оставлять или отбросить принцип относительности?
- чем заменить преобразования Галилея?

Преобразования Лоренца

Для координат:

$x' = (x - u\,t)/(1 - \beta^2)^{½}$; $y' = y$; $z' = z$

Для времени (новое преобразование):

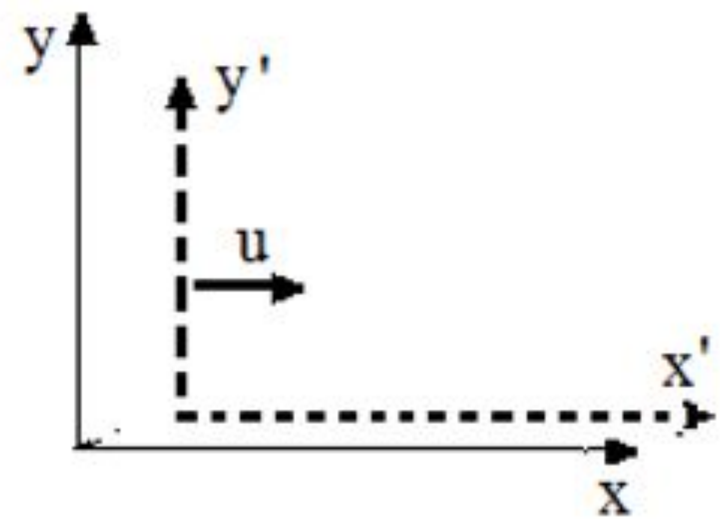
$t' = (t - ux/c^2)/(1 - \beta^2)^{½}$

Для скоростей:

$v_x' = (v_x - u)/(1 - uv_x/\,c^2)$;

$v_y' = (v_y/(1 - uv_x/\,c^2))(1 - \beta^2)^{½}$;

$v_z' = (v_z/(1 - uv_x/\,c^2))(1 - \beta^2)^{½}$

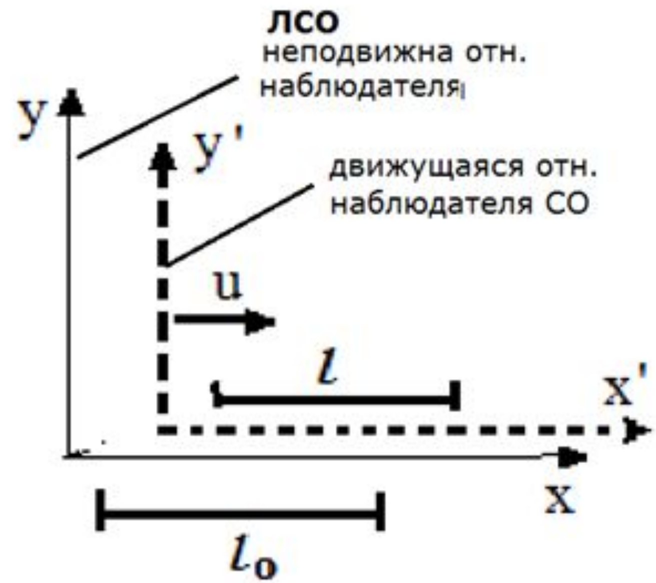


Основные следствия из преобразований Лоренца

1. *лоренцово сокращение* продольных размеров тел.

$$l = l_0 (1 - \beta^2)^{1/2}$$

l_0 – длина линейки, неподвижной отн. наблюдателя в ЛСО, *собственная длина*; l - длина такой же линейки, движущейся со скор. u вдоль своего направления.



2. *лоренцово замедление хода часов*

$$\Delta t = \Delta t_0 / (1 - \beta^2)^{1/2}$$

Δt_0 – время между 2 событиями, произошедшими с телом, по часам, покоящимся относительно этого тела, *собственное время*; Δt – время между теми же событиями по движущимся часам (движущиеся часы «замедляют» ход).

3. скорость света не зависит от движения источника

Если $v_x = c$, то $v_x' = (c - u)/(1 - uc/c^2) = (c - u)/(1 - u/c) = c$

Постулаты Эйнштейна (постулаты СТО)

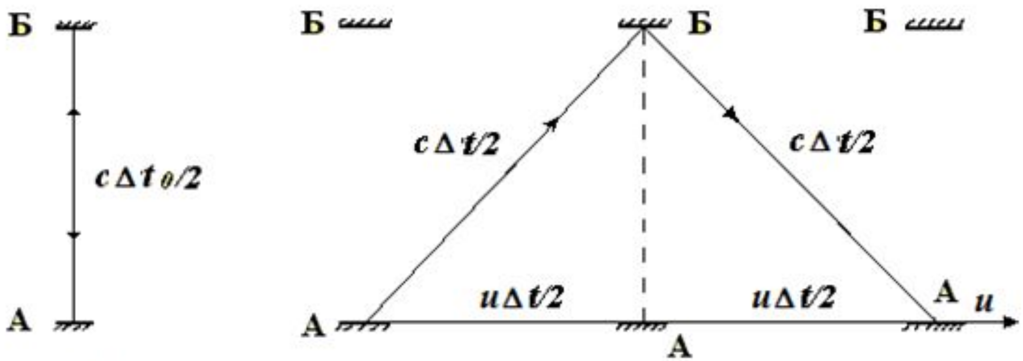
1. принцип относительности – никакими опытами внутри ИСО нельзя установить, движется она или покоится, все ИСО эквивалентны (формально ≡ принципу относительности Галилея, но относит не только к механическим явлениям, но к любым);

2. принцип постоянства скорости света – скорость света в пустоте одна и та же в любых условиях.

(не нужно объяснять следствие 3)

Световые часы и замедление их хода

2 зеркала, расположенных параллельно друг другу на расстоянии l_0 $\Rightarrow$ $\Delta t_0 = 2l_0/c$.



часы в ЛСО

движущиеся часы

2 экз. световых часов с равными базами l_0.

Один находится в ЛСО, наблюдатель видит их собств. период колебаний $\Delta t_0 = 2l_0/c$.

Второй движется со скор. u, наблюдатель из ЛСО обнаружит:

$$S = 2(l_0^2 + (u\,\Delta t/2)^2)^{1/2}$$

Δt – период колебаний светового пакета в движущихся часах:

$$\Delta t = S/c = (2(l_0^2 + (u\,\Delta t/2)^2)^{1/2})/c = ((2l_0/c)^2 + (u/c)^2\,\Delta t^2)^{1/2} = (\Delta t_0^2 + \beta^2\Delta t^2)^{1/2}$$

$$\Delta t^2 = \Delta t_0^2 + \beta^2\Delta t^2 \;\rightarrow\; \Delta t_0^2 = (1 - \beta^2)\,\Delta t^2 \;\rightarrow$$

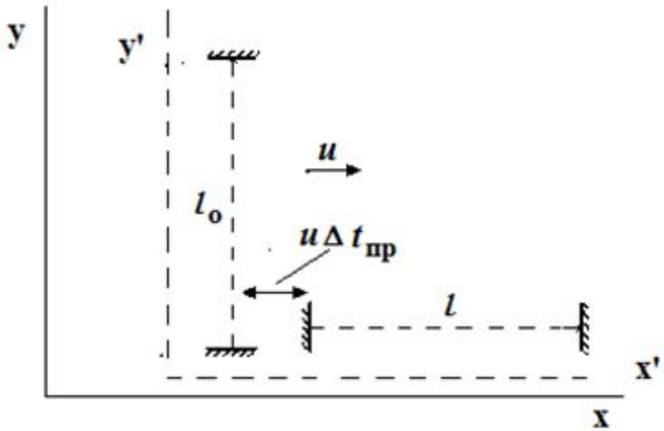
$\Delta t = \Delta t_0/(1 - \beta^2)^{1/2}$ - движущиеся часы замедляют ход (и $\forall$ другие, иначе нарушается принцип относительности)

Наблюдатель, движущийся вместе с часами, обнаружит замедление хода часов, оставшихся в ЛСО.

Лоренцово сокращение и световые часы (самостоятельно)

Для объяснения лоренцова сокращения в движущейся СО нужно двое одинаковых часов с базами || и ⊥ направлению скорости. Длину базы вертикальных часов можно измерять по штрихам на стенке в ЛСО. База горизонтальных часов равна ей в неподвижном состоянии. Если часы начинают двигаться, то горизонтальные часы должны иметь период колебаний тот же, что и вертикальные,

т.е.: $\Delta t = \Delta t_0/(1 - \beta^2)^{½} = 2l_0/c(1 - \beta^2)^{½}$



Для горизонтальных часов он равен сумме отрезков времени, затраченных пакетом на движение направо $\Delta t_{пр}$ и обратно, налево $\Delta t_{обр}$. При движении направо зеркала успеют переместиться на $u\ \Delta t_{пр}$, и путь пакета равен $s_{пр} = l + u\ \Delta t_{пр}$, значит:

$$\Delta t_{пр} = (l + u\ \Delta t_{пр})/c = l/c + (u/c)\ \Delta t_{пр}$$

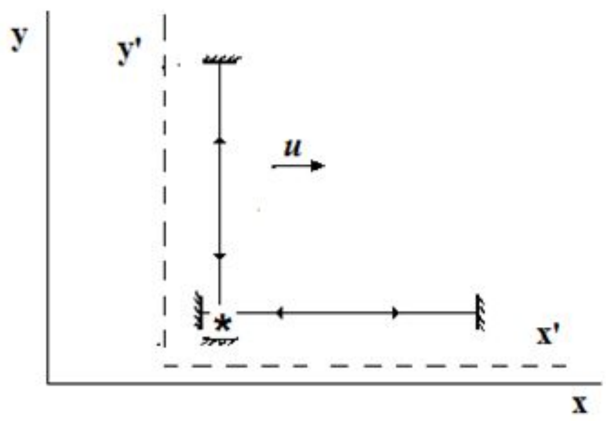
Отсюда: $\Delta t_{пр} = (l/c)/(1 - \beta\ )$.

Здесь l длина движущейся базы (не равна l_0).

При движении обратно левое зеркало переместится на $u\ \Delta t_{обр}$ навстречу пакету, и получится:

$$\Delta t_{обр} = (l/c)/(1 + \beta\ )$$

$$\Delta t = \Delta t_{пр} + \Delta t_{обр} = (2l/c)/(1 - \beta^2)$$



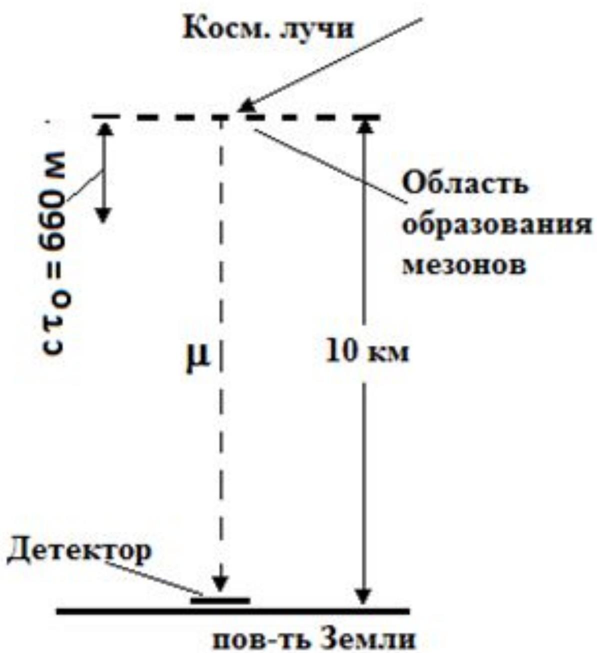
Приравниваем периоды вертикальных и горизонтальных часов:

$$2l_0/c(1 - \beta^2)^{½} = (2l/c)/(1 - \beta^2)$$

$$l = l_0\,(1 - \beta^2)^{½}$$

Поперечные размеры тел при движении остаются неизменными.

Экспериментальное наблюдение «замедления времени»



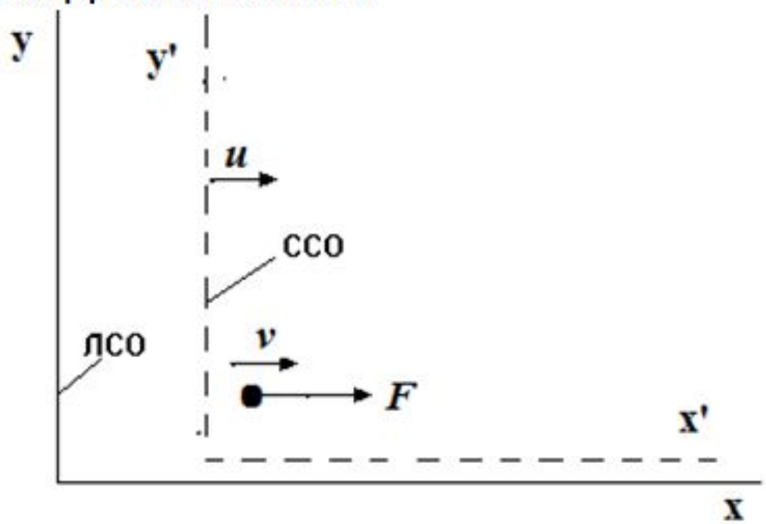
Космические лучи образуют в атмосфере на высотах > 10 км (ниже не проникают) μ-мезоны – частицы с массой в 200 раз больше, чем у электрона. Их можно получать в лабораторных условиях, но там их скорости малы. μ-мезоны нестабильны, их время жизни, измеренное на лабораторных мезонах, равно $\tau_0 = 2{,}2 \cdot 10^{-6}$ с. Мезоны, даже двигаясь со скоростью света, не должны пролетать расстояние больше $c\tau_0 \approx 660$ м. Однако детекторы регистрируют их у поверхности Земли. Скорость «космических» μ-мезонов ≈ скорости света. Благодаря этому их время жизни в ЛСО увеличивается:

$$\tau = \tau_0/(1 - \beta^2)^{1/2}$$

Если принять длину пробега μ-мезонов $c\tau$ равной 10 км, то получится $u = 0.996$ с.

Модификация 2 закона Ньютона в СТО

Если нельзя превзойти скорость света, то $\Delta v \to 0$ за $\forall$ промежуток времени Δt при $\forall$ силе и $w = 0$. 2 закон Ньютона $dv/dt = F/m$ следует видоизменить.



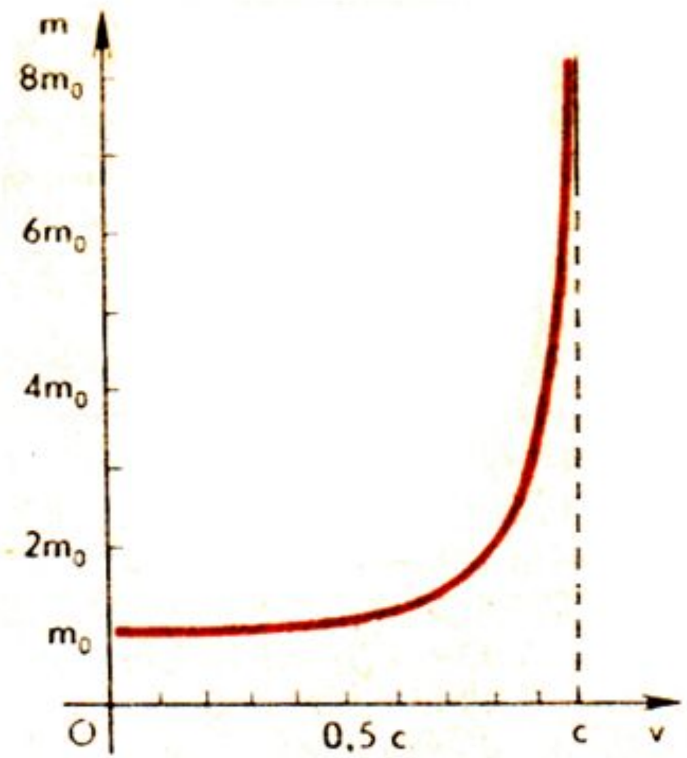
Тело движется со скоростью v вдоль оси x ЛСО, и к нему приложена сила F в том же направлении. Прямо применить 2 закон Ньютона нельзя.
Но можно перейти в другую ИСО, кот. наз. *сопровождающей СО* (ССО) и кот. движется отн. ЛСО со скоростью $u = v(t_0)$. В ССО можно применить к этому телу 2 закон Ньютона вблизи t_0, т.к. $v'(t_0') = 0$.

$$v'(t_0' + \Delta t') = \Delta v' = (F/m_0)\, \Delta t'$$

После преобразований:

$$w = F/(\, m_0/(1 - \beta^2)^{1/2})$$

Релятивистская масса



$$w = F/(m_0/(1 - \beta^2)^{1/2})$$

инертность тела определяется не m_0, которая наз. *массой покоя*, а величиной $m = m_0/(1 - \beta^2)^{1/2}$ - *релятивистской массой* тела.

Релятивистская масса зависит от скорости тела, равна массе покоя при малых скоростях и $\rightarrow \infty$ при $v \rightarrow c$.

Нельзя разогнать тело с $m_0 \neq 0$ до скорости $v > c$ – при приближении к ней стремится к ∞ инертность тела, его способность сопротивляться ускорению.

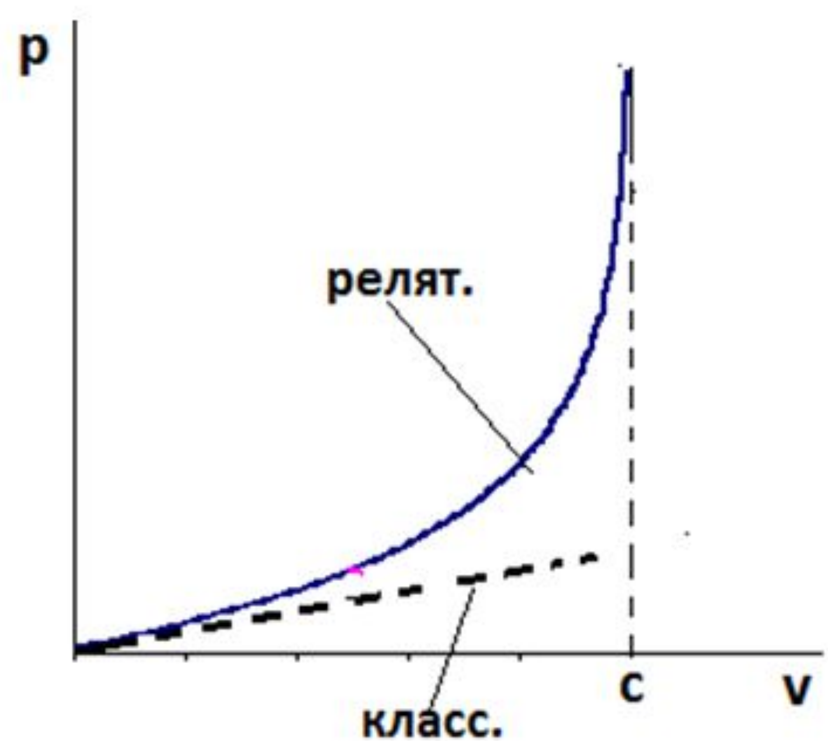
Основное уравнение динамики и релятивистский импульс

Основное уравнение динамики в СТО выглядит так же, как в классической механике:

$$d\mathbf{p}/dt = \mathbf{F}$$

но релятивистский импульс p определяется при этом как:

$$p = mv = m_0v/(1 - \beta^2)^{1/2}$$



КЭ тела, движущегося с большой скоростью

Следующий вопрос: энергия тела движущегося с релятивистскими скоростями.

$$dK/dt = F\,v = (dp/dt)(p/m) = (1/m)(pdp/dt)$$

Прямое интегрирование невозможно, т.к. $m = m(t)$ и не получается $K = p^2/2m$.

Обходной путь - рассмотрим комбинацию:

$$m^2c^4 = m_0{}^2c^4/(1 - \beta^2) = m_0{}^2c^4 + p^2c^2$$

$$mc^2 = (m_0{}^2c^4 + p^2c^2)^{½}$$

$$d(mc^2)/dt = ½(2p(dp/dt)c^2/(m_0{}^2c^4 + p^2c^2)^{½}) = dK/dt$$

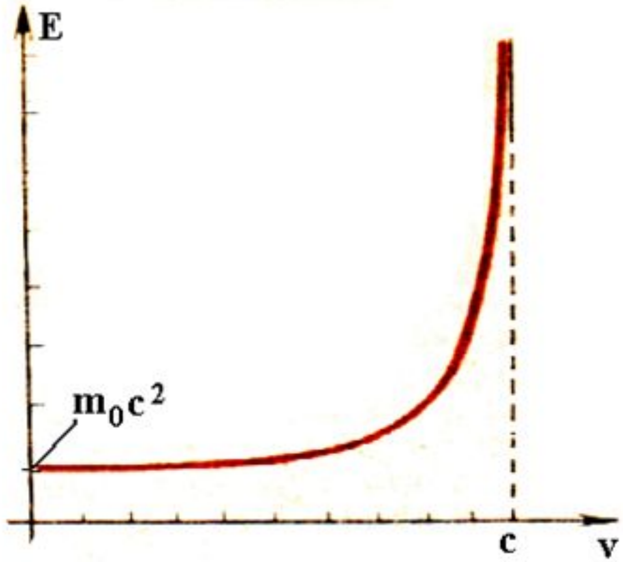
Это соотношение означает, что:

$$K = mc^2 + \mathrm{const}$$

Константу интегрирования можно найти из условия: К = 0 при $v = 0$, $m = m_0 \;\longrightarrow\; \mathrm{const} = -\,m_0c^2$

$$K = mc^2 - m_0c^2$$

Формула Эйнштейна и принцип эквивалентности массы и энергии



$$mc^2 = K + m_0c^2$$

Вел-на m_0c^2 - добавка к КЭ, а их сумма называется *полной релятивистской энергией* E, а m_0c^2 – *энергией покоя.*

$$E = mc^2$$

Энергия покоя - аналог ПЭ, но не зависит от координат, а существует всегда, где бы тело ни находилось.

Полная энергия появилась в соотношении:

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

Оно преобразуется к виду: $E^2 - p^2c^2 = m_0{}^2c^4$

ПЧ не зависит от скорости тела, а в ЛЧ находится комбинация зависящих от нее величин, которая называется *релятивистским инвариантом*.

$E = mc^2$ (формула Эйнштейна) - *принцип эквивалентности массы и энергии*.

Каждое ↑↓ энергии тела приводит к и↑↓ его массы и наоборот:

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

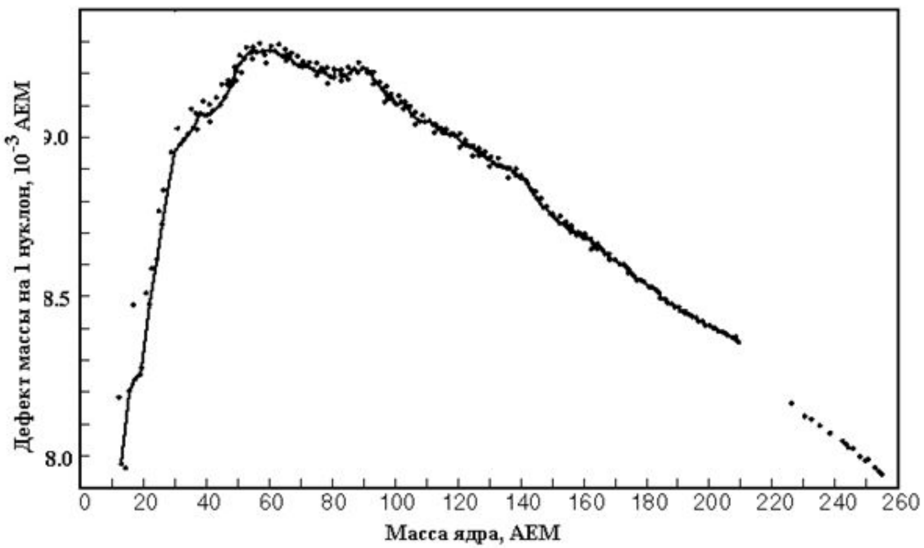
Эквивалентность массы-энергии и дефект массы

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

Массу можно выражать в ед. энергии, но для больших тел это неудобно – 1 г ↔ $9{\cdot}10^{13}$Дж. Этот прием распространен в атомной и ядерной физике, а в качестве единицы используется электронвольт.

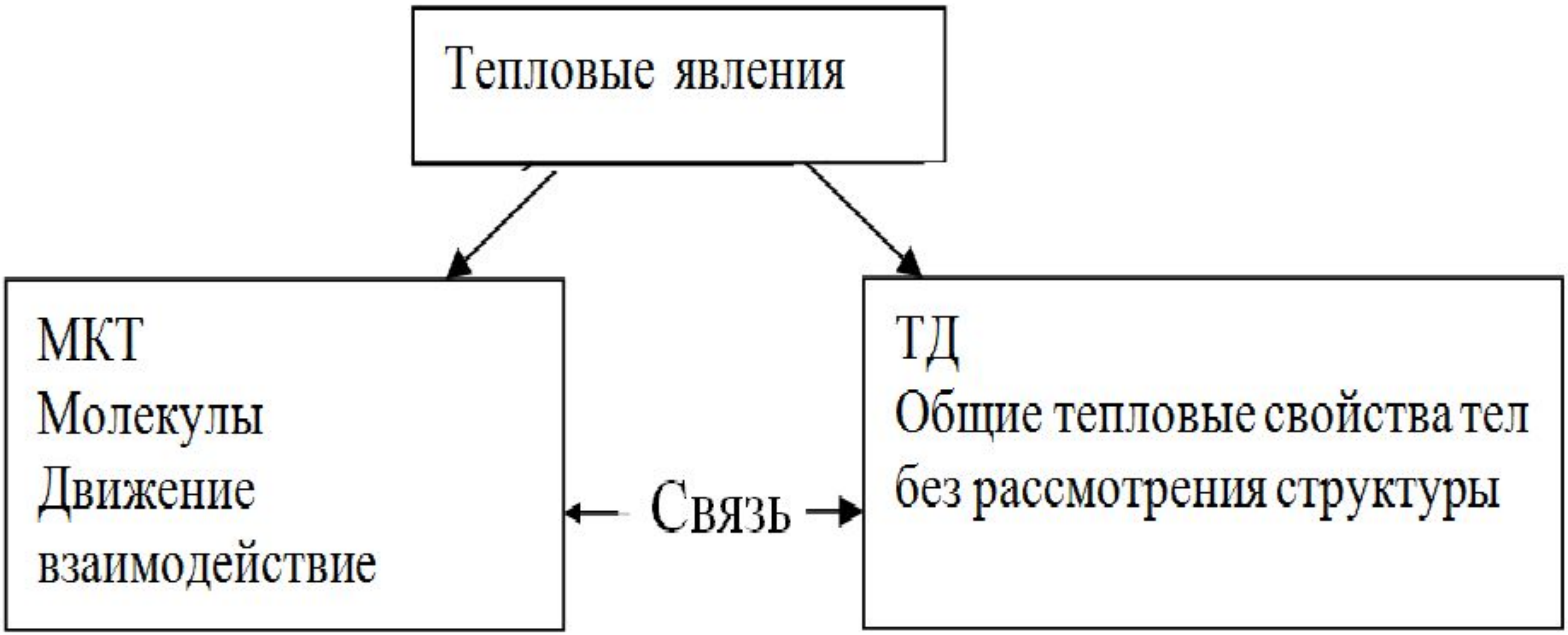
1 эВ = $1.6{\cdot}10^{-19}$ Дж – энергия, которую получает электрон ЭП с разностью потенциалов 1 В.

Напр., для электрона $m_e = 9{\cdot}10^{-31}$кг → $m_ec^2 = 0.51$ МэВ, для протона $m_p = 1.66{\cdot}10^{-27}$кг и $m_pc^2 \approx 940$ МэВ, 1 АЕМ = (1/12) $m_{C\text{-}12}$ → $mc^2 \approx 940$ МэВ.



Эквивалентность массы и энергии очевидна при расщеплении и синтезе ядер. Когда нейтроны и протоны сливаются в ядра, выделяется энергия и масса ядра оказывается < массы составляющих нейтронов и протонов – *дефект массы*. Это явление обнаруживается с помощью масс-спектрометрии. Самый большой дефект массы приходится на ядра с массой 50-60 АЕМ. Поэтому при расщеплении тяжелых ядер дефект массы ↑, что и приводит к выделению энергии.

Подходы к изучению тепловых явлений



мкт

1.все тела состоят из молекул;

2.молекулы находятся в непрерывном движении;

3.они притягиваются на больших расстояниях и отталкиваются на малых.

Переход к статистическому методу

- На основе этой гипотезы можно сделать 2 противоположных вывода:
- во-1, принципиально возможно найти траектории и скорости всех молекул и таким образом с помощью механики объяснить все тепловые явления;
- во-2, практически невозможно определить эти траектории и скорости, т.к. любое макроскопическое состоит из очень большого числа молекул из-за их малых размеров и масс.
- Масса атома H $1.66 \cdot 10^{-27}$кг
- Масса молекулы H_2 $3.3 \cdot 10^{-27}$кг
- Масса 1 л H_2 в норм. усл. 0.09 г = $9 \cdot 10^{-5}$кг
- Масса 1 мм^3 H_2 в норм. усл. $9 \cdot 10^{-11}$кг
- Число молекул H_2 в 1 мм^3 при норм. усл. $9 \cdot 10^{-11}$кг/$3.3 \cdot 10^{-27}$кг = $3 \cdot 10^{16}$
- Решить $3 \cdot 3 \cdot 10^{16}$ уравнений невозможно, но в этом и нет необходимости. При таком количестве молекул вклад каждой из них в свойства тела незначителен. Важно знать не скорость каждой молекулы, а число молекул, имеющих скорости вблизи определенного значения, иначе говоря, вероятность иметь такую скорость. Такой подход в отличие от ТД называется *статистическим*.