

ЗАКОНЫ НЬЮТОНА

Первый закон Ньютона.

Инерциальные системы отсчета.

Первый закон Ньютона (закон инерции):

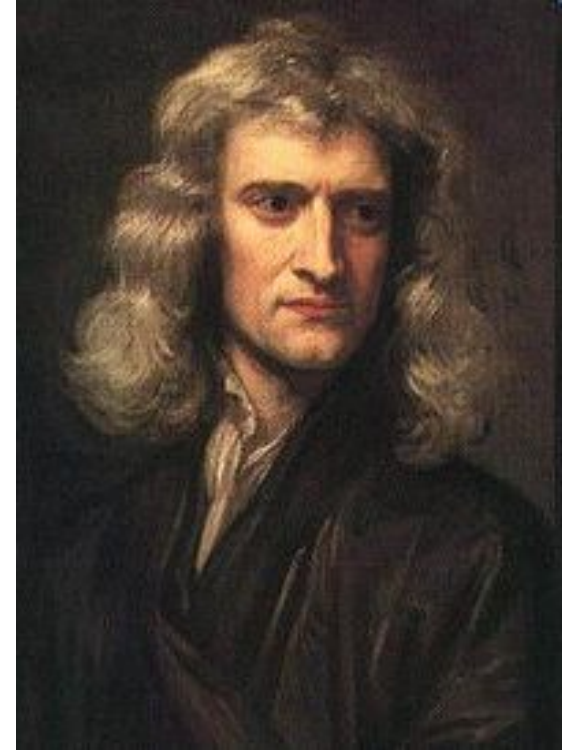
Тело движется равномерно и прямолинейно или сохраняет состояние покоя, пока воздействие других тел не изменит это состояние.

Эмпирический закон.

Его установление нетривиально, поскольку в реальных условиях всегда существует взаимодействие с другими телами.

Практически силы бывают скомпенсированы.

Пример: на катящийся вагон действует вес и реакция опоры. В результате, если трение мало, вагон движется почти равномерно.



Первый закон Ньютона. Инерциальные системы отсчета.

Инерциальная система отсчета – система отсчета, в которой соблюдается первый закон Ньютона.

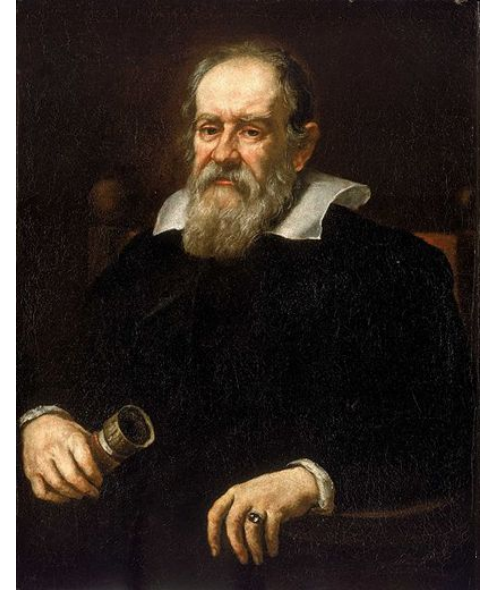
Принцип относительности Галилея.

Все инерциальные системы отсчета эквивалентны друг другу. И никакими механическими опытами, проведенными в данной инерциальной системе отсчета, нельзя определить, движется система или нет.

Примеры. Вагон поезда

Земля – инерциальная система с высокой степенью точности.

Можно ли с помощью какого-либо механического опыта установить, что Земля всё-таки не вполне инерциальная система?



Первый закон Ньютона. Инерциальные системы отсчета.

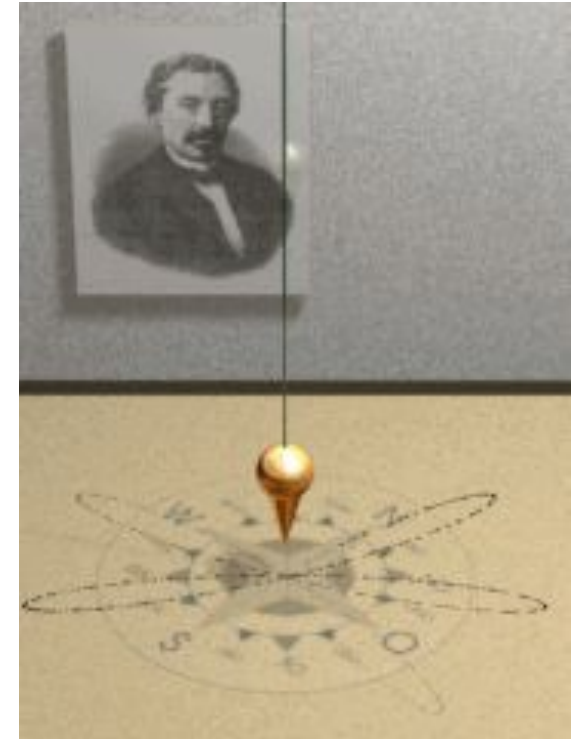
Маятник Фуко - демонстрирует влияние суточного вращения Земли на механическое движение.

Инерциальная система отсчёта (система отсчёта, «связанная» со звёздами) – плоскость колебаний маятника неподвижна.

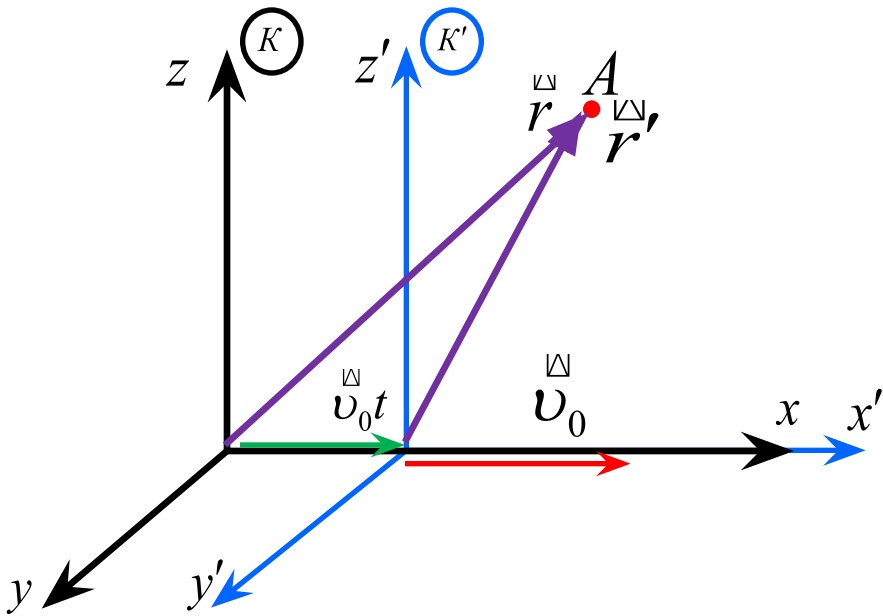
Наблюдатель, находящийся на Земле и вращающийся вместе с нею, находится в неинерциальной (вращающейся) системе отсчёта.

Он будет видеть, что плоскость колебаний маятника поворачивается относительно земной поверхности в сторону, противоположную направлению вращения Земли.

Длинный подвес – Исаакиевский Собор – 98 м.



Преобразования Галилея.



$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{v}_0 t$$

Связь между
положениями мат.
точки A в 2-х ИСО



$$x' = x - v_0 t$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Преобразования
Галилея для
координат мат.
точки A в 2-х ИСО



$$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{v}_0$$

$$v'_x = v_x - v_0$$

$$v'_y = v_y$$

$$v'_z = v_z$$

Преобразования
Галилея для
скоростей мат.
точки A в 2-х ИСО

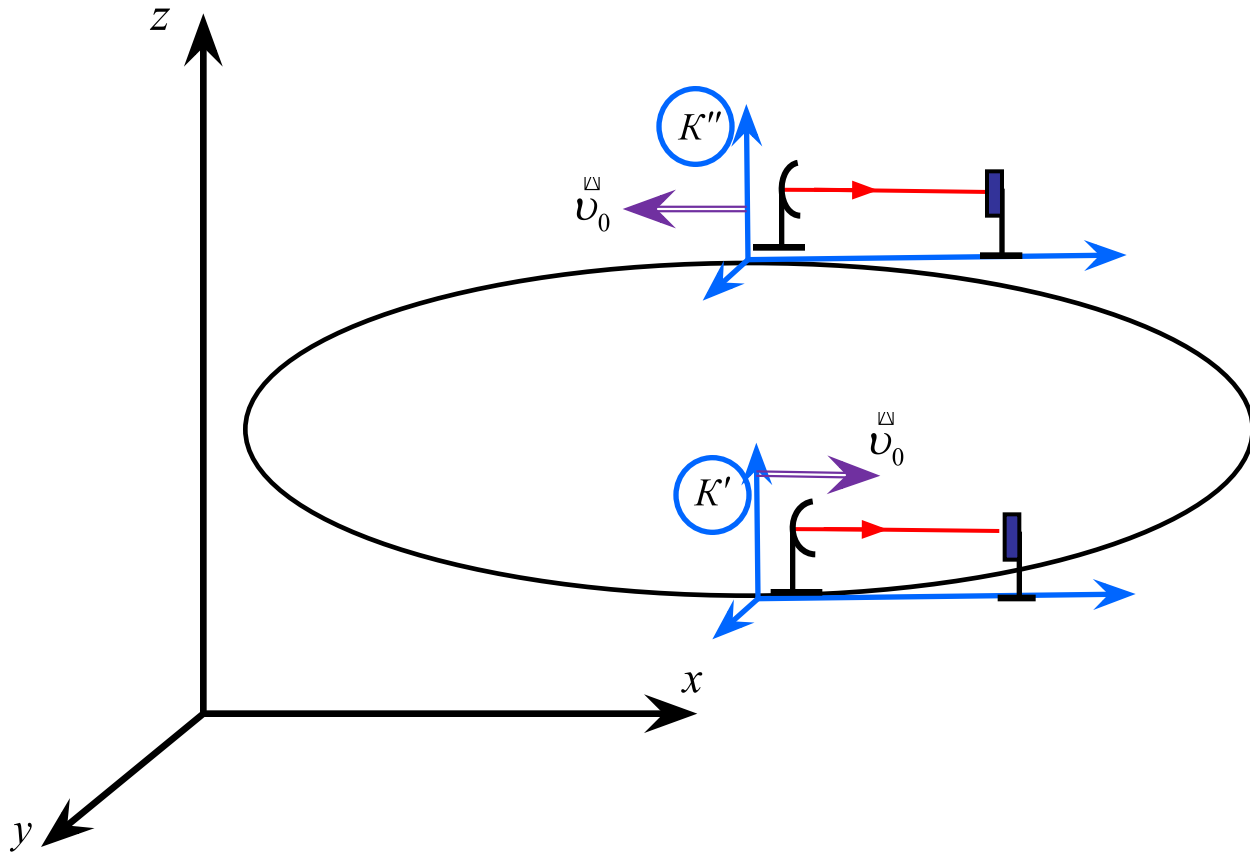
Трудности классической механики.

...Гипотеза «светоносного эфира»...

...Абсолютная ИСО...

Если измерение скорости света в данной ИСО позволит определить её скорость относительно абсолютной ИСО, то следует подвергнуть сомнению принцип относительности Галилея !!!???

Идея опыта Майкельсона и Морли, исходящих из предположения о существовании светового эфира.



$$K' \Rightarrow c' = c - v_0$$

Через полгода:

$$K'' \Rightarrow c'' = c + v_0$$



Результат:

$$c'' - c' = 2v_0$$



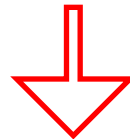
$$v_0 = \frac{c'' - c'}{2} !$$

скорость света в K K K соответственно

Скорость света во всех экспериментах была одинаковой.

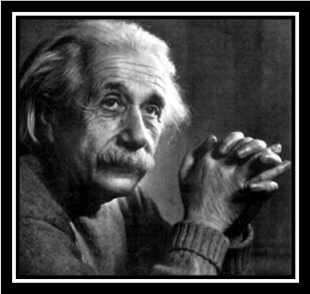
Светоносного эфира нет!

$$c' = c'' = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} !!!$$



Подвергаются сомнению преобразования Галилея, а не принцип относительности.

4. Постулаты специальной теории относительности А.Эйнштейна.



1. ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Все инерциальные системы отсчета(ИСО) эквивалентны друг другу. Никакими физическими опытами, проведенными в данной ИСО, нельзя определить, движется система или нет. Во всех ИСО свойства пространства и времени одинаковы.

2. ПРИНЦИП ИНВАРИАНТНОСТИ СКОРОСТИ СВЕТА

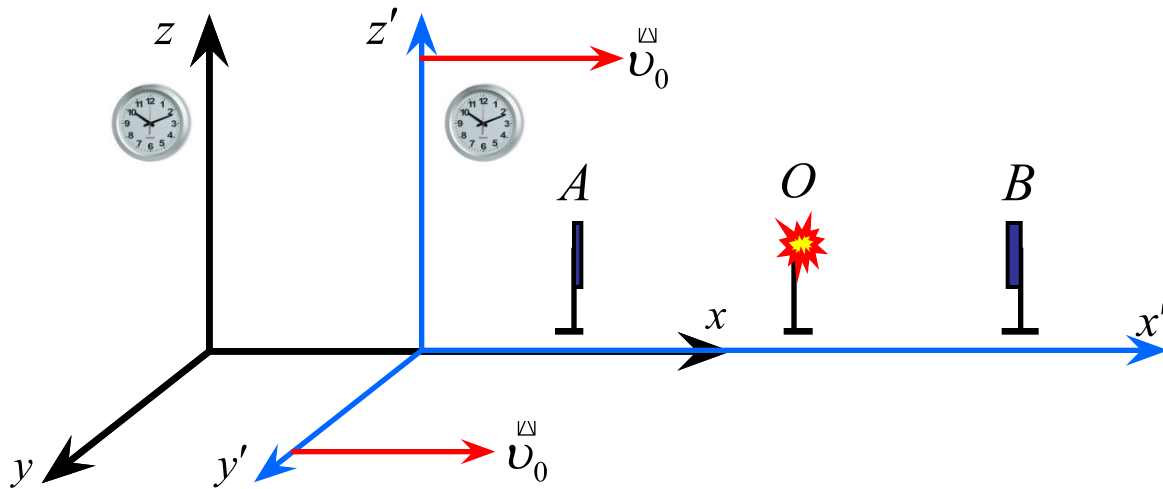
Скорость света в вакууме не зависит от движения источника и одинакова во всех направлениях, т.е. одинакова во всех системах отсчета.

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

5. Следствия из постулатов Эйнштейна. Преобразования

Лоренца.

1) Относительность течения времени в различных системах отсчета.



$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

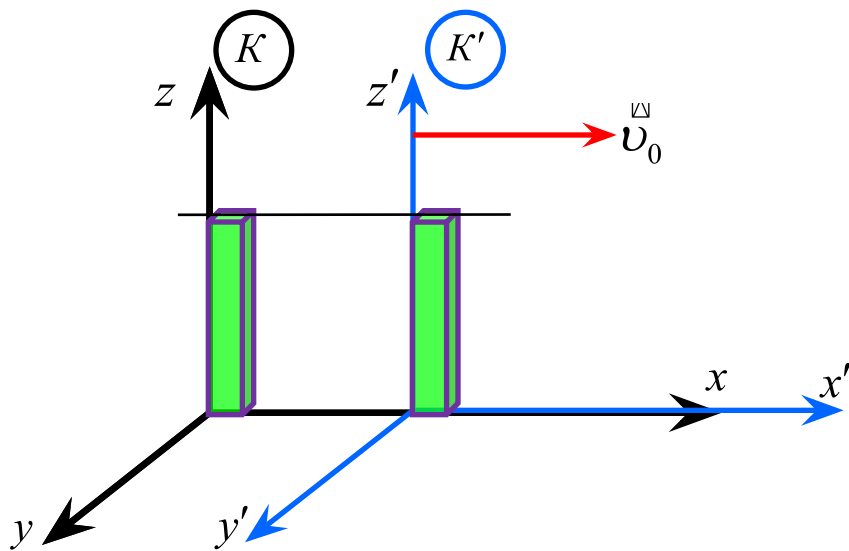
~~Мет:~~ ~~А~~ ~~О~~ ~~В~~ вспышки приходит в А и В одно

временно

~~В~~ свет приходит в А раньше чем, в В .

Вывод: два события одновременные в одной инерциальной системе не являются таковыми в другой инерциальной системе отсчета.

2) Независимость поперечных размеров тел от инерциальной системы отсчета



Из эквивалентности ИСО следует, что высота одинаковых вертикальных стержней не может различаться при их относительном движении.

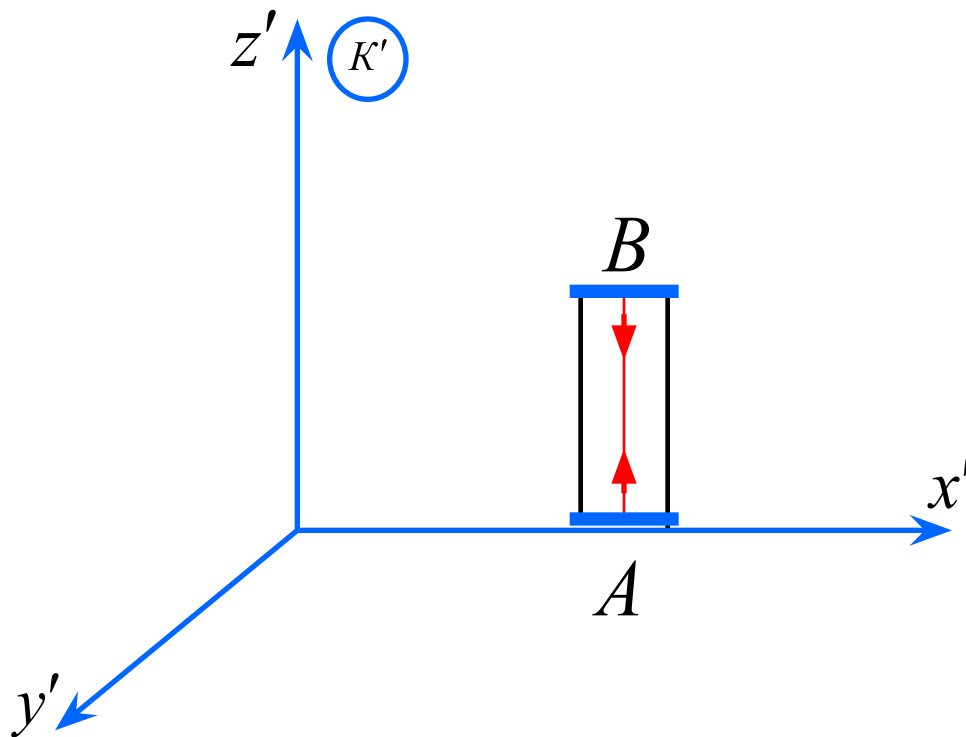


Поперечные размеры тел одинаковы в K и K'



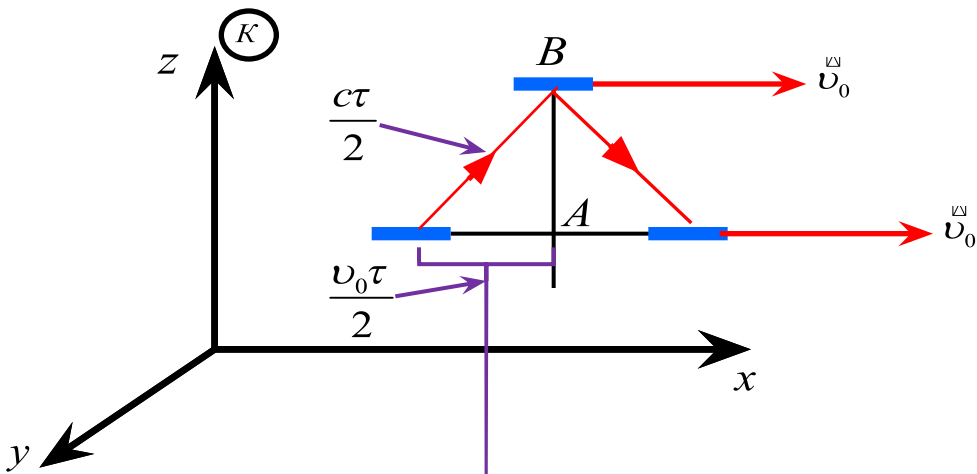
$$\begin{aligned}y' &= y \\z' &= z\end{aligned}$$

3) Замедление течения времени в подвижной системе отсчета.



Метод моих неподвижных часов

$$\text{равен} \Rightarrow \tau_0 = \frac{2AB}{c} \Rightarrow AB = \frac{c\tau_0}{2}$$



Можно утверждать, что часы движутся со скоростью v_0 :

$$\left(\frac{c\tau}{2}\right)^2 = \left(\frac{v_0\tau}{2}\right)^2 + (AB)^2 = \left(\frac{v_0\tau}{2}\right)^2 + \left(\frac{c\tau_0}{2}\right)^2$$

$$\left(\frac{c\tau}{2}\right)^2 - \left(\frac{v_0\tau}{2}\right)^2 = \left(\frac{c\tau_0}{2}\right)^2 \Rightarrow \tau^2 = \frac{c^2\tau_0^2}{c^2 - v_0^2}$$

период подвижных часов:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}} \Rightarrow \tau > \tau_0$$



$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}$$

Вывод: Время в подвижной системе отсчета течет медленнее, чем в покоящейся системе отсчета.

Δt_0 **Собственное время** (минимально)

4) Прямые преобразования Лоренца.

$$(x, y, z, t) \Rightarrow (x', y', z', t')$$

$$x' = \frac{x - v_0 t}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}} = \frac{x - v_0 t}{\sqrt{1 - \beta^2}};$$

$$\beta = \frac{v_0}{c}$$

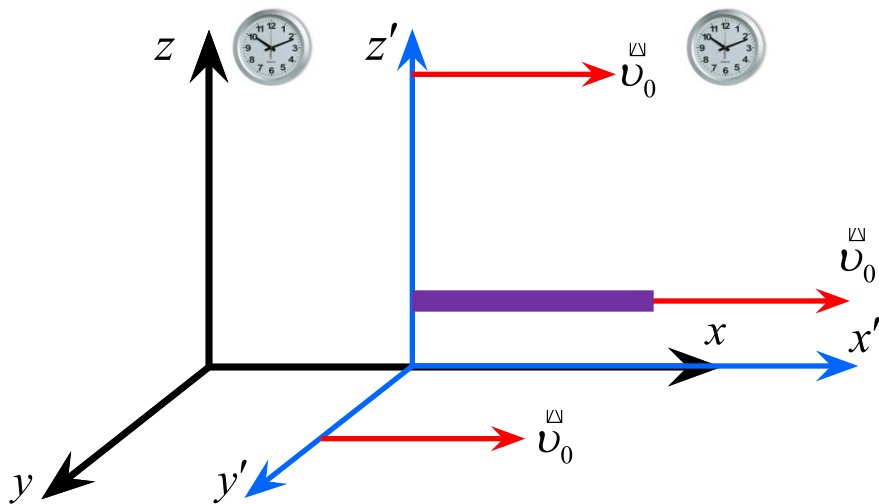
$$y' = y; \quad z' = z$$

$$t' = \frac{t - \left(\frac{v_0}{c^2}\right)x}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}} = \frac{t - \left(\frac{v_0}{c^2}\right)x}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Преобразования Лоренца - результат поиска соотношений, оставляющих инвариантными (неизменными) законы физики.

Когда $v_0 \ll c$, пр-ия Лоренца переходят в пр-ия Галилея.

5) Сокращение продольных размеров движущихся тел.



$$x' \sqrt{1 - \beta^2} = x - v_0 t$$

координаты
концов стержня в K'

координаты
концов стержня в K



$$(x'_2 - x'_1) \sqrt{1 - \beta^2} = x_2 - x_1$$

$$\ell_0 \sqrt{1 - \beta^2} = \ell$$



«Лоренцево» сокращение продольных
размеров тел.



$$\ell < \ell_0$$

«Собственная
длина»

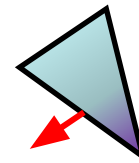
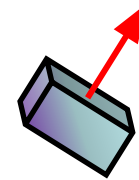
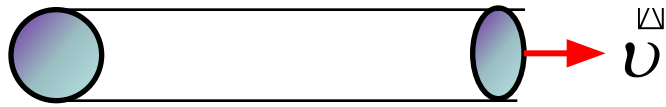
Время в системе отсчета, движущейся с часами, течет медленнее (для наблюдателя, относительно которого происходит движение).

Это же относится ко всем процессам, протекающим в движущимся относительно наблюдателя системах отсчета.

Экспериментальное доказательство: нестабильные частицы мюоны с временем жизни 2 мкс.(собственное время), образующиеся в верхних слоях атмосферы (20-30км) достигают поверхности Земли, т.к. их время течет медленнее, а расстояние до поверхности Земли сокращается.

(С т.з. кл. физики макс.расстояние, пролетаемое мюонами, не должно быть более $2 \cdot 10^{-6} \text{ с} \times 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 600 \text{ м}$)

Изменение формы тел, движущихся со скоростью близкой к скорости света,
из-за сокращения их продольных размеров



Понятия продольных
размеров тел, промежутка
времени также
относительны, как и
понятия движения и покоя.



Взаимодействие тел. Второй закон Ньютона.

Второй закон Ньютона связывает *силу*, *массу* и *ускорение*.

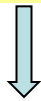
Сила даёт меру и направление воздействия, оказываемого на данное тело со стороны других тел.

Масса отвечает за то как тело «отзывается» на данное воздействие, т.е. за его инертность.

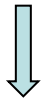
Сила вызывает

изменение скорости тела и его деформацию.

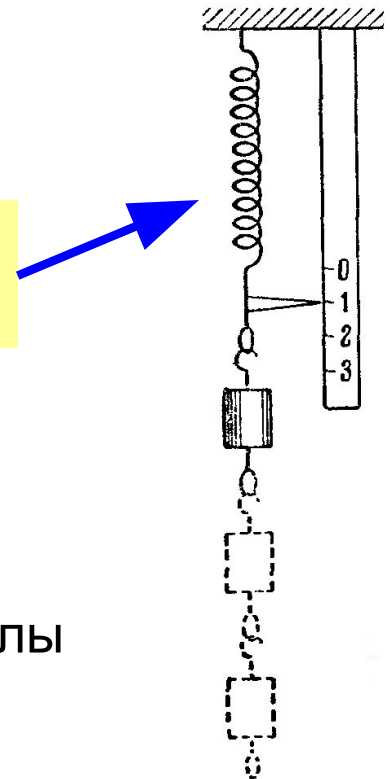
Пример: сила вызывает деформацию пружины и эта деформация пропорциональна приложенной силе.



Прибор для измерения силы –
динамометр.



Силу можно измерить и благодаря этому сравнивать силы разной природы, например, гравитационные, электромагнитные и др.



Взаимодействие тел. Второй закон Ньютона.

Сила – величина векторная (\vec{F}):

численное значение $|\vec{F}|$, F

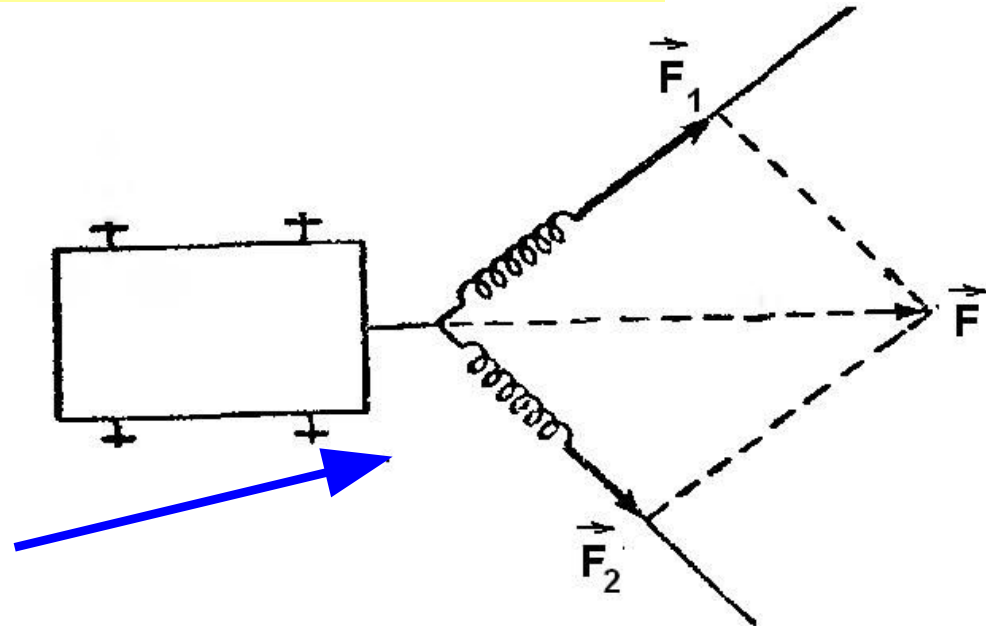
направление в пространстве

точка приложения.

Силы складываются по правилу параллелограмма.

Силы возникают как при непосредственном контакте, так и через посредство создаваемых телами полей.

С учётом современных представлений об атомном строении тел, силы возникающие «при непосредственном контакте» также имеют полевую природу.



Взаимодействие тел. Второй закон Ньютона.

Силы бывают:

1. **Гравитационные**, действуют на любые массы и порождаются массой, действуя на расстоянии.
2. **Электромагнитные**, действуют на заряды и токи со стороны других зарядов и токов.
3. **Ядерные**, именно они скрепляют ядро, несмотря на сильное электростатическое отталкивание между протонами.
4. **Слабые силы**, имеющие малый радиус действия (физика элементарных частиц).

Взаимодействие тел. Второй закон Ньютона.

Масса – определяет инерциальные и гравитационные свойства материи.

Современные физические представления \implies Масса – это просто количество материи.

Тела состоят из атомов, которые в свою очередь состоят из протонов, нейтронов и электронов.

$m \sim$ (число протонов + число нейтронов + число электронов)

Чем больше в теле материи (протонов и нейтронов), тем оно сильнее притягивает другие тела в соответствии с законом всемирного тяготения

$$F \propto \frac{m_1 m_2}{R^2}$$

Чем больше в теле материи (протонов и нейтронов), тем труднее изменить его скорость в соответствии со вторым законом Ньютона:

$$\frac{dv}{dt} = a = \frac{F}{m}$$

Ускорение, с которым движется материальная точка, равно отношению результирующей всех сил, действующих на нее, к ее массе.

Взаимодействие тел. Второй закон Ньютона.

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

Ускорение, с которым движется материальная точка, равно отношению результирующей всех сил, действующих на нее, к ее массе.

Второй закон Ньютона - основной закон классической механики.

Важное замечание о гравитационных и инерционных проявлениях массы:

Ускорение свободного падения не зависит от массы (Галилей, Пизанская башня) \implies сила притяжения пропорциональна той же массе, которая стоит во втором законе Ньютона и отвечает за инертность:

с ростом массы растёт сила, но также растёт и инертность – в результате ускорение остаётся тем же.

Взаимодействие тел. Второй закон Ньютона.

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

Ускорение, с которым движется материальная точка, равно отношению результирующей всех сил, действующих на нее, к ее массе.

Второй закон относится к **движению материальной точки**.

Однако реально он может применяться гораздо шире благодаря теореме о движении центра масс механической системы:

центр масс движется как точка, масса которой равна массе всей системы, к которой приложены все внешние силы.

Выбирая в качестве материальной точки центр масс, можно второй закон применить к любому телу или системе тел.

Взаимодействие тел. Второй закон Ньютона.

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

Ускорение, с которым движется материальная точка, равно отношению результирующей всех сил, действующих на нее, к ее массе.

В общем случае для тел переменной массы (например, ракета):

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \vec{F}$$

Вводя импульс материальной точки

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

приходим к второму закону Ньютона в форме

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$$

Скорость изменения импульса материальной точки во времени равна результирующей силе, действующей на материальную точку.

Второй закон Ньютона в таком виде справедлив в частности тогда, когда классическая физика уже не корректна – при скоростях сравнимых со скоростью света, когда масса зависит от скорости.

Взаимодействие тел. Второй закон Ньютона.

$$\frac{dv}{dt} = a = \frac{F}{m}$$

Ускорение, с которым движется материальная точка, равно отношению результирующей всех сил, действующих на нее, к ее массе.

Второй закон \longrightarrow описание механических движений с помощью дифференциальных уравнений \longrightarrow положение тела и его скорость в любые моменты времени.

Единицы измерения

Основные механические величины в системе СИ:

длина L , м, масса M , кг, время T , сек.

Все другие механические величины производятся из M , L и T с помощью соответствующих уравнений.

формула размерности

Например, $v = \Delta S / \Delta t \longrightarrow$

$[v] = LT^{-1}$,

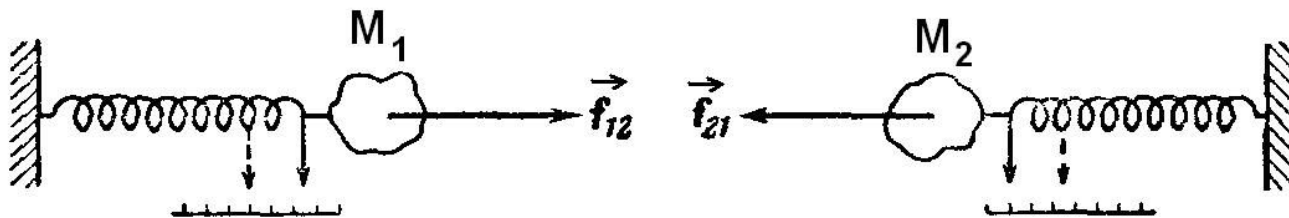
$F = ma \longrightarrow [F] = MLT^{-2} \longrightarrow$ кг м/сек² \longrightarrow Ньютон

$a = \Delta v / \Delta t \longrightarrow [a] = LT^{-2}$,

Размерности в левой и правой части уравнения - одинаковые!!

Третий закон Ньютона, закон изменения и сохранения импульса системы материальных точек.

Всякое действие тел друг на друга носит характер **взаимодействия**.



Если тело M_1 действует на тело M_2 с силой \vec{f}_{12} , то и тело M_2 действует на тело M_2 с силой \vec{f}_{21}

Опыт показывает (**Третий закон Ньютона**):

силы, с которыми две материальные точки действуют друг на друга, имеют одинаковую природу, всегда равны по модулю и направлены в противоположные стороны вдоль прямой, соединяющей эти точки:

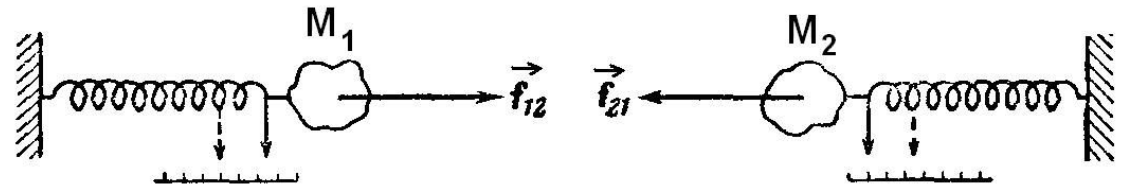
$$\vec{f}_{12} = -\vec{f}_{21}$$

Третий закон Ньютона, закон изменения и сохранения импульса системы материальных точек.

$$f_{12} = -f_{21}$$



Силы всегда возникают попарно.



Эти силы *не уравнивают* друг друга - они приложены к разным телам.

Третий закон Ньютона, закон изменения и сохранения импульса

Закон изменения и сохранения импульса для материальной точки.

Пусть материальная точка движется под действием некоторой результирующей силы \vec{F} .

По второму закону Ньютона: $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$, $\implies d\vec{p} = \vec{F}dt \implies$

$$\implies \int_{\vec{p}_1}^{\vec{p}_2} d\vec{p} = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F}dt \implies \vec{p}_2 - \vec{p}_1 = \Delta\vec{p} = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F}dt$$

\vec{p}_1 импульс материальной точки в момент времени t_1 .

\vec{p}_2 импульс материальной точки в момент времени t_2 .

Импульс
силы

Изменение импульса материальной точки $\Delta\vec{p}$ равно импульсу результирующей силы, действующему на материальную точку за промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$.

1-й закон
Ньютона

Импульс материальной точки сохраняется, если результирующая сила равна 0.

Третий закон Ньютона, закон изменения и сохранения импульса

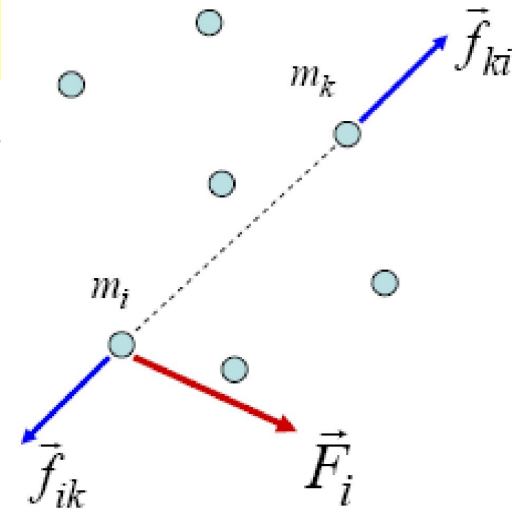
Закон изменения и сохранения импульса для системы материальных точек.

$$m_1, m_2 \dots m_i \dots m_k \dots m_N$$

$$\vec{p}_1, \vec{p}_2 \dots \vec{p}_i \dots \vec{p}_k \dots \vec{p}_N$$

f_{ik} - внутренняя сила, действует со стороны м. т. массой m_k на м.т. с массой m_i .

\vec{F}_i - результирующая всех внешних сил, действующих на i -ю м.т.



Второй закон Ньютона для i -й материальной точки:

$$\frac{dp_i}{dt} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N f_{ik} + F_i$$

Напишем такие же уравнения для всех м. т. и просуммируем по i от 1 до N :

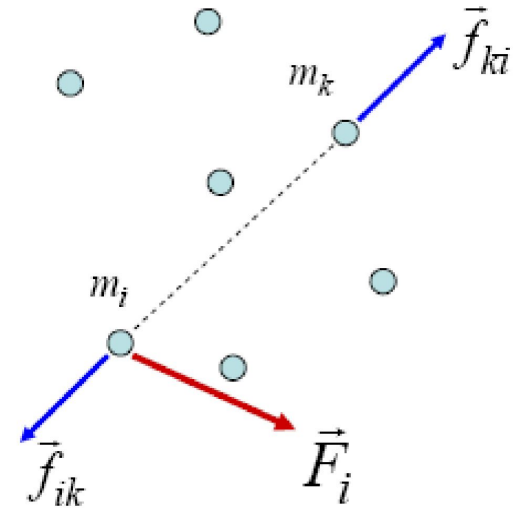
$$\sum_{i=1}^N \frac{dp_i}{dt} = \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N f_{ik} + \sum_{i=1}^N F_i$$

По III закону Ньютона: $f_{ik} = -f_{ki} \implies \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N f_{ik} = 0$

=0

Третий закон Ньютона, закон изменения и сохранения импульса

Закон изменения и сохранения импульса для системы материальных точек.



$$\sum_{i=1}^N \frac{d\vec{p}_i}{dt} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i = \frac{d \sum_{i=1}^N \vec{p}_i}{dt} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i$$

$$\sum_{i=1}^N \vec{p}_i = \vec{P} \quad \text{Импульс системы материальных точек}$$

$$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = \vec{F} \quad \text{Результирующая всех внешних сил}$$

$$\frac{dP}{dt} = F$$

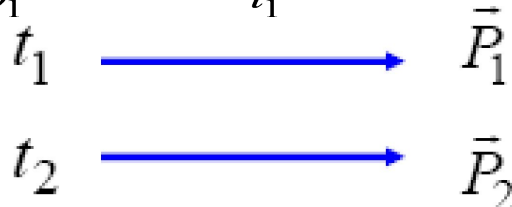
Скорость изменения импульса системы м.т. (тел) равна результирующей всех внешних сил.

$$dP = F dt$$

$$\int_{P_1}^{P_2} dP = \int_{t_1}^{t_2} F dt \quad \longrightarrow$$

$$P_2 - P_1 = \Delta P = \int_{t_1}^{t_2} F dt$$

Импульс системы материальных точек в момент времени



Третий закон Ньютона, закон изменения и сохранения импульса

Закон изменения и сохранения импульса для системы материальных точек.

$$\vec{P}_2 - \vec{P}_1 = \Delta \vec{P} = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} dt$$

Закон изменения импульса:

Изменение импульса системы материальных точек за некоторый промежуток времени равно импульсу результирующей всех внешних сил, действующих на систему за этот промежуток времени.

$$\vec{F} = 0 \implies \vec{P} = \text{const}$$

Импульс системы материальных точек есть величина постоянная, если векторная сумма всех внешних сил, действующих на систему, равна нулю.

Частный случай: $\vec{P} = \text{const}$ в замкнутой (изолированной) системе.

Пример: реактивное движение.

Если $\vec{F}_i = 0$,
то такая система называется
замкнутая система

Третий закон Ньютона, закон изменения и сохранения импульса

Закон сохранения импульса в замкнутой системе – фундаментальный закон физики.

Закон сохранения импульса в замкнутой системе - справедлив не только в классической, но и в **релятивистской и квантовой механике**.

Закон сохранения импульса в замкнутой системе можно вывести из **однородности пространства**, не прибегая к 3 закону Ньютона.

Тогда 3 закон Ньютона получится как следствие закона сохранения импульса или следствие однородности пространства.

Движение центра инерции (массы) тела (системы тел)

Представим тело (систему тел), как систему N материальных точек с массой Δm_i , где $i = 1 \dots N$

Введем радиус-вектор некоторой точки C как

$$\vec{r}_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^N \Delta m_i \vec{r}_i$$

Δm_i – масса i -й материальной точки;

\vec{r}_i – радиус-вектор i -й м. т.

$m = \sum_{i=1}^N \Delta m_i$ – масса тела (системы тел).

$$x_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^N \Delta m_i x_i \quad y_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^N \Delta m_i y_i \quad z_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^N \Delta m_i z_i$$

Координаты центра инерции

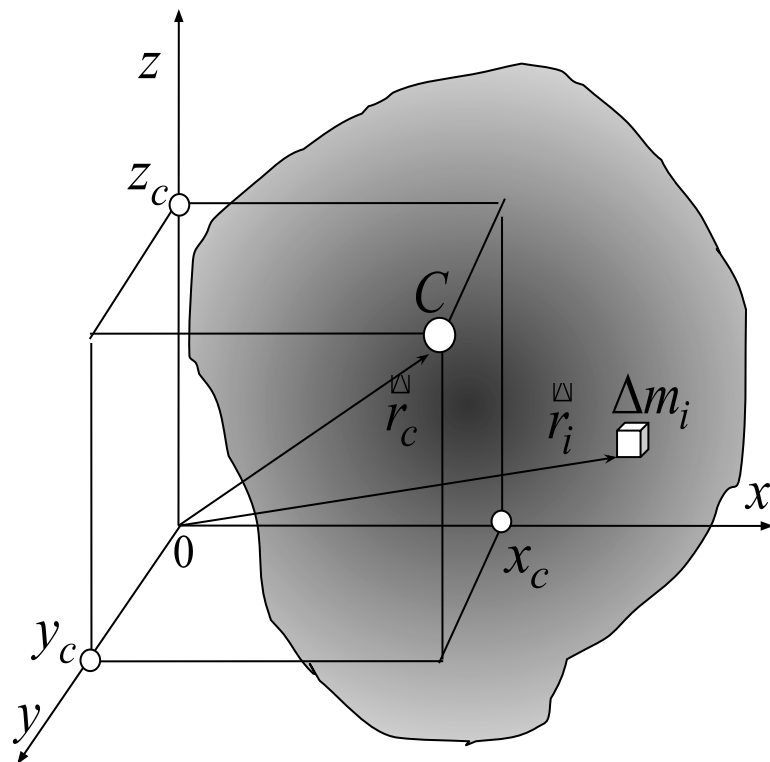


Рис. 7

точка C называется центром инерции или центром масс тела (системы тел) или центром тяжести (последнее в однородном поле гравитации).

Движение центра инерции (массы) тела (системы тел)

$$\vec{r}_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^N \Delta m_i \vec{r}_i$$

Скорость центра инерции

$$\vec{v}_c = \frac{d\vec{r}_c}{dt} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^N \Delta m_i \frac{d\vec{r}_i}{dt} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^N \Delta m_i \vec{v}_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^N \vec{p}_i = \frac{1}{m} \vec{P} \quad \Longrightarrow \quad \vec{P} = m\vec{v}_c$$

Полный импульс системы материальных точек (тела) равен произведению массы системы материальных точек (тела) на скорость центра инерции.

Для изменения полного импульса системы найдено $\frac{d\vec{P}}{dt} = \frac{d(m\vec{v}_c)}{dt} = \vec{F}$

Центр инерции тела (системы тел) движется так же, как двигалась бы материальная точка с массой m под действием результирующей всех внешних сил, приложенных к телу (системе тел).

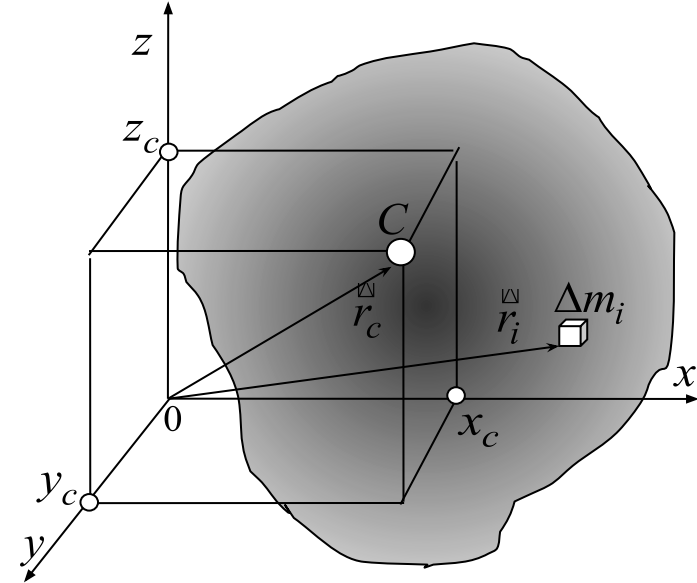


Рис. 7

Значение доказанной теоремы состоит в следующем.

1. Теорема дает обоснование методам динамики точки. Из уравнений (16') видно, что *решения, которые мы получаем, рассматривая данное тело как материальную точку, определяют закон движения центра масс этого тела, т. е. имеют вполне конкретный смысл.*

В частности, если тело движется поступательно, то его движение полностью определяется движением центра масс. Таким образом, *поступательно движущееся тело можно всегда рассматривать как материальную точку с массой, равной массе тела.* В остальных случаях тело можно рассматривать как материальную точку лишь тогда, когда практически для определения положения тела достаточно знать положение его центра масс и допустимо по условиям решаемой задачи не принимать во внимание вращательную часть движения тела.

2. Теорема позволяет при определении закона движения центра масс любой системы исключать из рассмотрения все наперед неизвестные внутренние силы. В этом состоит ее практическая ценность.

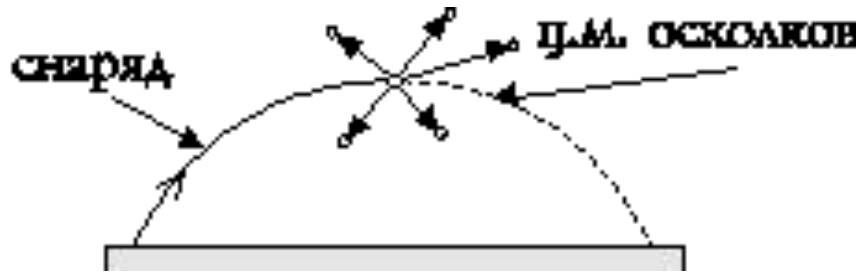


Рис. 9

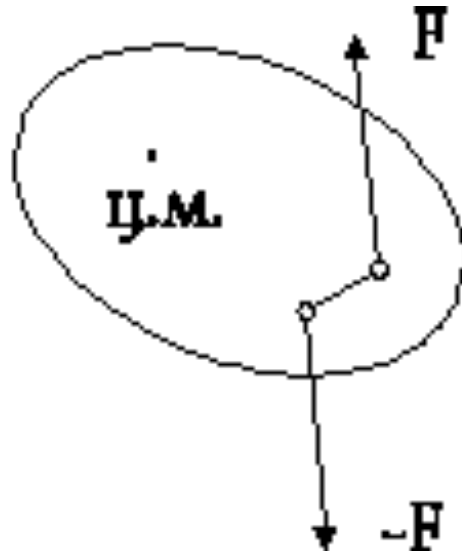
Пример 1. В некоторой точке траектории снаряд разрывается на множество осколков (рис. 9). Как будет двигаться их центр масс?

Центр масс "полетит" по той же параболической траектории, по которой двигался бы неразорвавшийся снаряд: его ускорение в соответствии с (28) определяется суммой всех сил тяжести, приложенных к осколкам, и общей их массой, т.е. тем же уравнением, что и движение целого снаряда.

Однако, как только первый осколок ударится о Землю, к внешним силам тяжести добавится сила реакции Земли и движение центра масс исказится.

Пример 2. На покоящееся тело начинает действовать "пара" сил F и F (рис. 10). Как будет двигаться тело?

Поскольку геометрическая сумма внешних сил равна нулю, ускорение центра масс также равно нулю и он останется в покое. Тело будет вращаться вокруг неподвижного центра масс.



Первый закон Ньютона. Инерциальные системы отсчета.

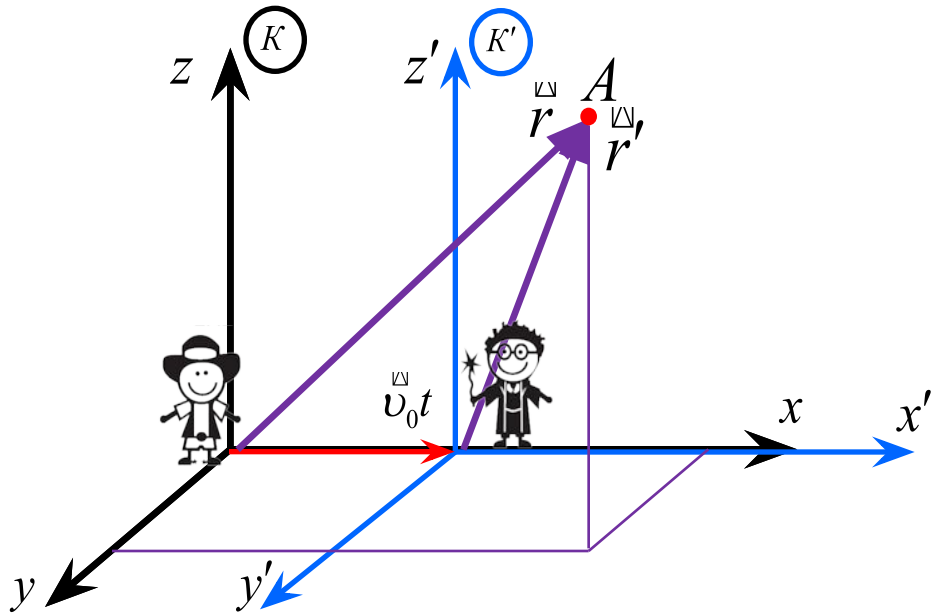
В гелиоцентрической системе 1 закон Ньютона выполняется практически точно, эта система отсчёта с высокой степенью точности является инерциальной.

А. Эйнштейн на основании достижений физики 20-го века обобщил принцип относительности Галилея.

Принцип относительности Эйнштейна:

Все инерциальные системы отсчета эквивалентны друг другу. И никакими физическими опытами нельзя определить, движется система или нет.





Преобразования Галилея.

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{v}_0 t$$

Связь между положениями мат. точки А в 2-х ИСО



$$x' = x - v_0 t$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Преобразования Галилея для координат мат. точки А в 2-х ИСО



$$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{v}_0$$

$$v'_x = v_x - v_0$$

$$v'_y = v_y$$

$$v'_z = v_z$$

Преобразования Галилея для скоростей мат. точки А в 2-х ИСО