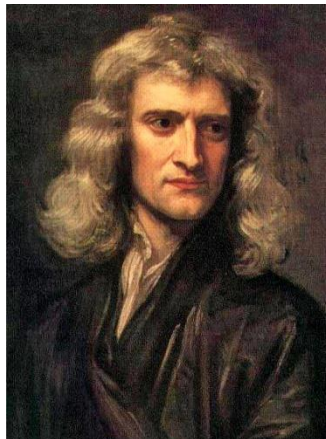


5. Инерциальные системы отсчета. Понятие массы. Первый закон Ньютона.

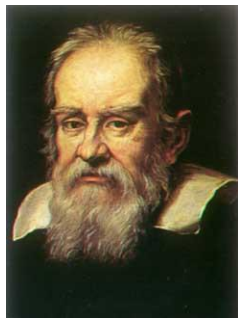
Основные законы механики были окончательно сформулированы английским ученым И. Ньютоном в 1687 г. в труде “Математические начала натуральной философии”.

Ньютон обобщил разрозненные опытные законы и создал теоретические основы механики.



Исаак Ньютон
(1642-1727)

англичанин



Галилео Галилей
(1564-1642)

итальянец



Иоганн Кеплер
(1571-1630)

немец



Христиан Гюйгенс
(1629-1695)

нидерландец



Роберт Гук
(1635-1703)

англичанин

Первый закон Ньютона.

Закон установлен итальянским ученым Г. Галилеем.

Всякая материальная точка сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор пока воздействие со стороны других тел не выведет её из этого состояния.

В законе рассматриваются два состояния точки - покой и равномерное прямолинейное движение.

Они объединяются тем, что $\vec{a} = 0$. Значит можно сказать:
 $\vec{v} = \text{Const} \cdot \vec{v} = 0$.

Скорость любого тела остается постоянной (в частности равна нулю) пока воздействие на него других тел не вызовет её изменения.

Первый закон Ньютона справедлив только для материальных точек, так как твердое тело может деформироваться и вращаться, о чем не говорится в законе. В формулировке говорится о воздействии только тел, однако могут оказывать действие и поля – второй вид материи.

Способность тел сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения называется **инертностью**.

Поэтому первый закон Ньютона обычно называют **законом инерции**.

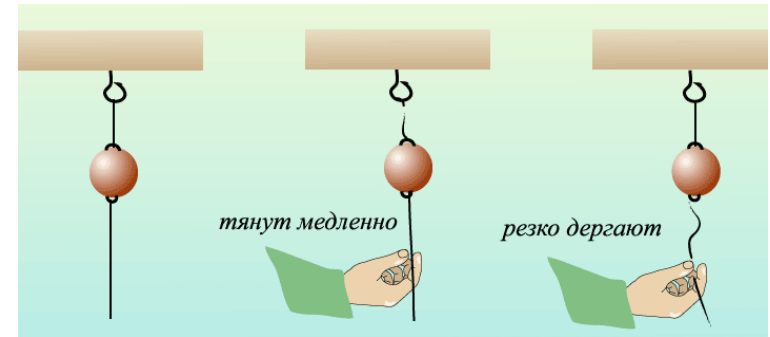
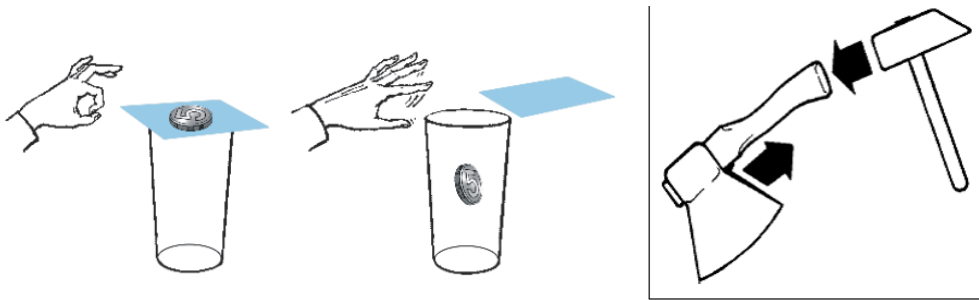
Тело не испытывающее воздействия со стороны других тел называется свободным .

Движение свободного тела – это движение по инерции.

Для его поддержания не требуется внешних воздействий.

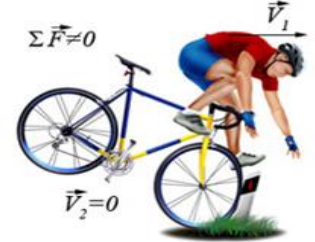
Инерция тела – не причина его движения, это их свойство.

Инерциальные системы отсчета.



Примеры применения инерции тел

Закон инерции часто нарушается, выполняется не во всех системах.



Это, например, движение в транспорте и движение по криволинейной траектории, хотя космонавт неподвижен относительно корабля, но движется с кораблем по эллипсу.

Системы отсчета, в которых выполняется первый закон Ньютона, называются **инерциальными системами отсчета**.

Суть (значение) первого закона Ньютона сводится к двум утверждениям:

1. Все тела обладают свойством инертности.
2. Существуют инерциальные системы отсчета.

В природе нет полностью свободных тел (всемирное тяготение). С большой степенью точности инерционной системой является **гелиоцентрическая система отсчета** (гелиос — греческое — солнце).



Земная система отсчета строго говоря неинерциальна. Она движется по эллипсу вокруг Солнца со $\langle v \rangle \approx 30 \text{ км/с}$, вращается вокруг оси с $a_{n,max} \approx \frac{0,034 \text{ м}}{c^2}$ или $\approx 0,3\%$

$|a_{n,max}| \approx 10^{-6} \langle v \rangle$ - это ничтожно малая величина, поэтому система отсчета, связанная с Землей, практически инерциальна.



Преобразования Галлилея:

$$\begin{cases} x = x' + v_0 t' \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{cases} \quad \begin{cases} \vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}_0 t' \\ t = t' \end{cases}$$

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

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

Никакими механическими опытами невозможно установить - покоится данная инерциальная система отсчета или движется прямолинейно и равномерно

Система отсчета, связанная со свободным телом, является инерциальной.

Любая другая система, движущаяся прямолинейно и равномерно (т.е. с постоянной скоростью, в том числе и с нулевой) относительно инерциальной системы, также будет инерциальной.

Вывод: Ускорение свободной материальной точки в любой инерциальной системе отсчета равно нулю.

Любые две инерциальные системы отсчета могут двигаться друг относительно друга только поступательно и только равномерно и прямолинейно или быть взаимно неподвижными.

Понятие массы.

Благодаря инертности тела при действии других тел приобретают ускорения, т.е. изменяют скорость своего движения не мгновенно, а постепенно. Количественной характеристикой инертности тел является масса.

Масса тела — физическая скалярная величина, являющаяся одной из основных характеристик материи, определяющая её инерционные и гравитационные свойства.

Эти свойства материи совершенно различны, не сводятся к одному. Инерционные свойства характеризует **инертная масса**, характеризует способность материи к сохранению своего движения. В более широком смысле под **инерцией** понимают запаздывание реакции тела (прибора) на внешнее воздействие.

Гравитационные свойства характеризует тяжелая или гравитационная масса, характеризует способность материи в взаимодействию на расстоянии согласно всемирному притяжению.

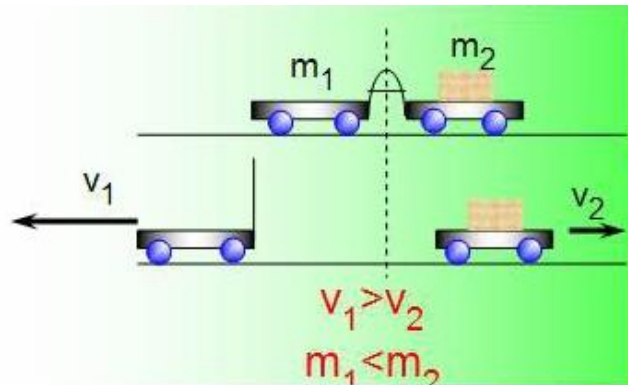
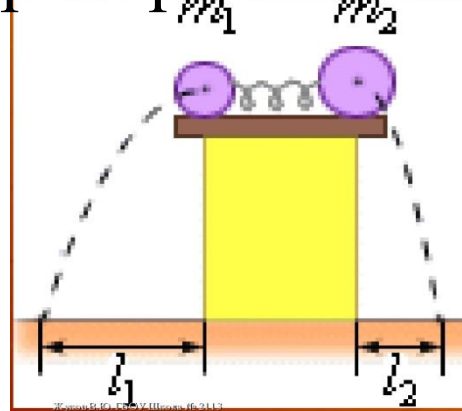
Инертная и тяжелая массы у тел численно совпадают с относительной погрешностью 10^{-12} - последние измерения в 1971 году советскими физиками В. Б. Брагинским и В. И. Пановым.

Единица массы – **килограмм**, одна из основных единиц измерения в международной системе СИ.

Масса – величина **аддитивная**: масса СИСТЕМЫ тел равна сумме масс всех частей этой системы.

Система тел, взаимодействующих только между собой и не взаимодействующих с другими внешними телами, называется **замкнутой системой**.

Опыты показывают, что приращения скоростей двух взаимодействующих частиц замкнутой системы, обратно пропорциональны массам этих частиц.



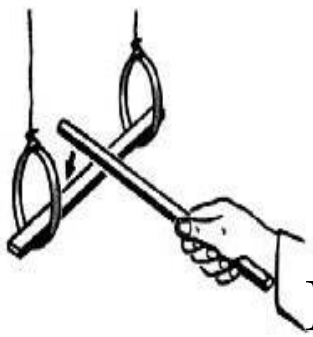
$$\frac{|\Delta v_1|}{|\Delta v_2|} = \frac{m_2}{m_1}$$

$$\Delta(m_1 v_1) = -\Delta(m_2 v_2)$$

$$m_2 > m_1$$

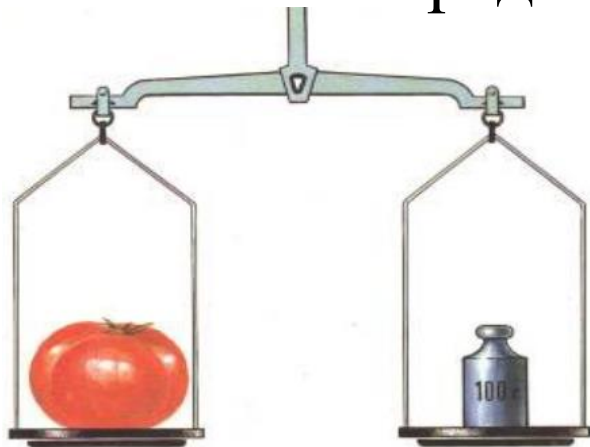
$$\vec{P} = m\vec{v}$$

импульс тела – мера интенсивности механического движения, учитывает быстроту движения и инертность тела.



При взаимодействии измеряется инертная масса.

Тяжелая масса определяется при взвешивании тел.



Равенство инертной и тяжелой масс — фундаментальный закон природы, который называется **принципом эквивалентности**. Принцип положен А. Эйнштейном в основу общей теории относительности.

В специальной теории относительности масса зависит от скорости тела, где m_0 - масса покоя тела (при $v = 0$),

c - скорость света в вакууме.

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

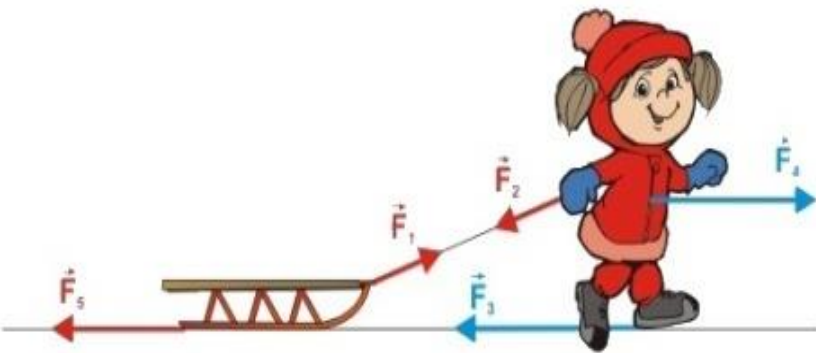
6. Сила и импульс тела. Второй закон Ньютона. Уравнение движения материальной точки.

В качестве меры механического воздействия одного тела на другое вводится понятие силы.

Сила – это векторная величина, являющаяся мерой механического воздействия на тело со стороны другого тела или поля, в результате которого тело приобретает ускорение или деформируется.

Воздействие каждого тела или поля (взаимодействие тел на расстоянии) заменяется действием одной или двух сил (сила давления и сила трения), с другой стороны действие каждой силы вызвано обязательно воздействием какого-то тела.

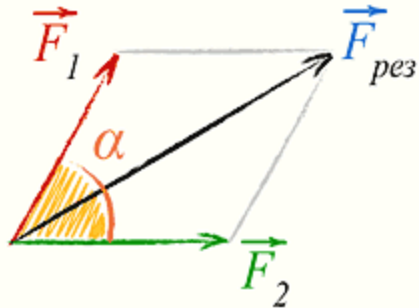
Есть сила – есть тело, оказывающее силовое действие. Сила является причиной, вызывающей изменение состояния движения тел, и возникающая в результате взаимодействия тел при непосредственном контакте (сила упругости и сила трения), так и на некотором расстоянии друг от друга (сила тяжести).



Сила F полностью определена, если задан модуль силы, направление в пространстве и точка приложения — **сила векторная величина.**

Прямая, проведенная через точку приложения силы в направлении её действия, называется **линией действия силы**.

Действие силы на абсолютно твердое тело не изменится при переносе её точки приложения вдоль линии действия силы — это **скользящие вектора**.

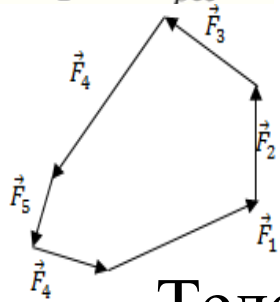
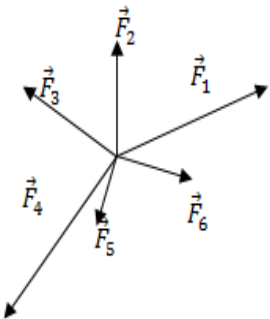


$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}_{рез}$$

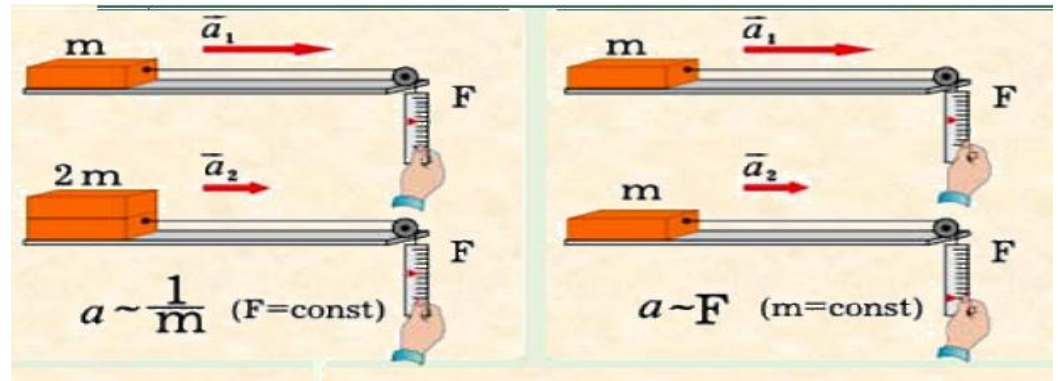
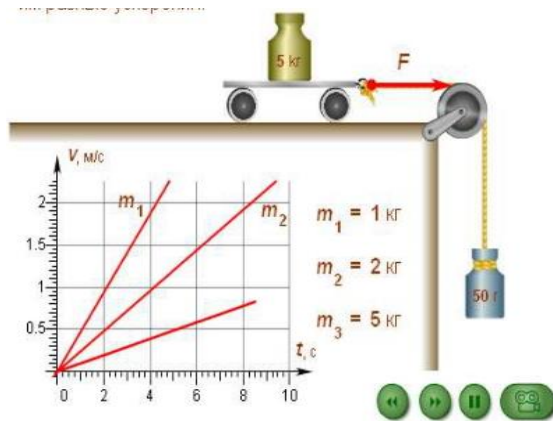
Если на тело действуют одновременно несколько сил, приложенных в одной точке, их можно заменить одной силой, приложенной в той же точке, равной геометрической сумме сил, которая называется **резльтирующей** или **равнодействующей** силой.

$\vec{F}_{равн} = 0$ -силы взаимно уравниваются.

Тело либо покоится, либо движется поступательно равномерно и прямолинейно.



Второй закон Ньютона.



Экспериментальный закон поступательного движения тела.

Ускорение, приобретаемое материальной точкой, прямо пропорционально вызывающей его сил, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе материальной точки.

$$\vec{a} = k \frac{\vec{F}}{m} \quad \text{В СИ } k = 1 \quad \text{итог} \quad \boxed{\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}}$$

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Произведение массы материальной точки на её ускорение равно действующей на точку силе.

$$m = \text{Const}$$

- формулировка второго закона Ньютона
Единица измерения силы в СИ – НЬЮТОН
 $[F] = \text{H} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$

Закон выражает принцип причинности в классической механике, устанавливает однозначную связь между положением точки в пространстве в начальный момент времени (\vec{r}_0 и \vec{v}_0) и действующей на неё силы – причина движения – с определенным однозначным положением точки в любой последующий момент времени – следствие причины.

Возможно представление результирующей силы в виде суммы двух составляющих: касательную и нормальную

$$\vec{F} = \vec{F}_\tau + \vec{F}_n \quad \left| \begin{array}{l} |F_n| = ma_n = \frac{mv^2}{R_{dv}} \text{ - центростремительная сила} \\ |F_\tau| = ma_\tau = m \frac{dv}{dt} \text{ - направлена к центру кривизны} \end{array} \right. \text{изменяет скорость по величине}$$

Принцип независимости действия сил:

Если на материальную точку одновременно действует несколько сил, то каждая из них сообщает точке такое же ускорение, как если бы других сил не было.

$$\vec{F}_{\text{рез}} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i \rightarrow \vec{a} = \frac{\vec{F}_{\text{рез}}}{m} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \sum_{i=1}^n \frac{\vec{F}_i}{m}$$

Более общая формулировка второго закона Ньютона, которая справедлива и в релятивистской механике,:

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

Скорость изменения импульса материальной точки равна действующей на неё силы.

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} \quad \text{- это уравнение движения материальной точки.}$$

Вектор $\vec{F} dt$ называется элементарным импульсом силы.

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

Изменение импульса материальной точки равно импульсу результирующей силы, действующей на материальную точку.

Очередная формулировка второго закона Ньютона.

$$\text{Если } \vec{F} = 0 \text{ то } \vec{P} = \text{Const} \rightarrow \vec{a} = 0$$

Точка движется равномерно и прямолинейно в соответствии с первым законом Ньютона. Это не означает, что первый закон вытекает из второго закона. Оба закона равносильны.

Первый закон Ньютона является самостоятельным законом, так как именно он утверждает существование инерциальных систем отсчета, в которых в частности только и выполняется второй закон Ньютона.

Второй закон Ньютона справедлив строго для материальной точки.

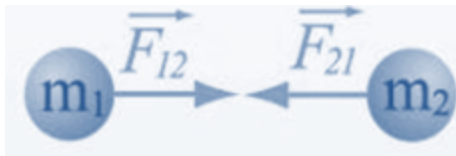
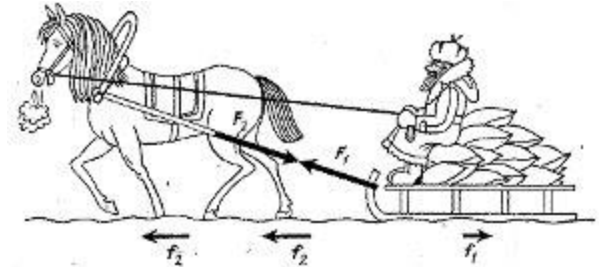
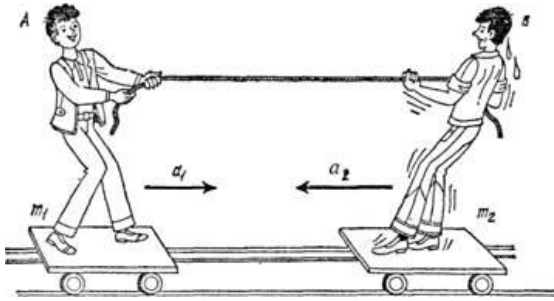
Для твердого тела его можно применить, если:

1. тело не деформируется. При деформации ускорения разных точек тела будут разные и изменение движения тела с помощью одного ускорения описать нельзя;

2. для абсолютно твердого тела линия действия силы должна проходить через определенную точку тела — центр инерции тела. Только при этом условии тело движется поступательно.

7. Третий закон Ньютона.

Центр масс и закон его движения.

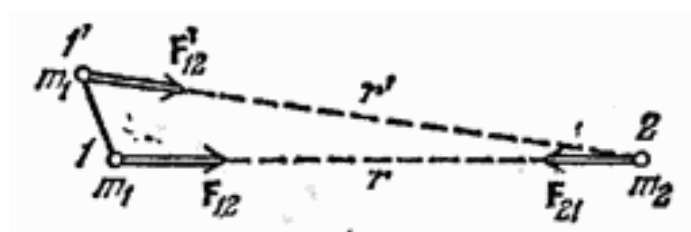
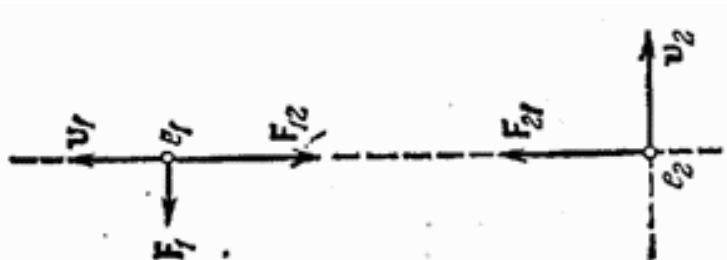


Воздействие тел друг на друга всегда носит характер взаимодействия.

Силы, с которыми действуют друг на друга материальные точки, всегда равны по модулю, противоположны по направлению и действуют вдоль прямой, соединяющей эти точки.

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \quad \text{Третий закон Ньютона.}$$

Силы взаимодействия двух тел всегда являются силами одной физической природы, они приложены к разным телам и поэтому не уравнивают друг друга.



Примеры нарушения третьего закона Ньютона.

Ньютоновская механика справедлива лишь для скоростей движения во много раз меньших скорости света.

При этом а) магнитная сила взаимодействия зарядов пренебрежимо мала по сравнению с силой электростатического притяжения ,

б) скорость возмущение поля кажется бесконечно большой – третий закон Ньютона практически справедлив в обоих случаях.

Третий закон Ньютона позволяет перейти от динамики отдельной материальной точки к динамике системы материальных точек и к динамике произвольной механической системы.

Для каждой точки системы запишем второй закон Ньютона

$$n \text{ уравнений } \left\{ \frac{d}{dt} (m_i \vec{v}_i) = \vec{F}_i^{\text{внеш}} + \vec{F}_i^{\text{внут}} \right.$$

Общий импульс системы $\vec{P} = \sum_{i=1}^n \vec{P}_i = \sum_{i=1}^n (m_i \vec{v}_i)$

Сумма уравнений точек $\sum_{i=1}^n \frac{d}{dt} (m_i \vec{v}_i) = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i^{\text{внеш}} + \sum_{i=1}^n \vec{F}_i^{\text{внут}}$

По третьему закону $\vec{F}_{ij} = -\vec{F}_{ji}$ значит $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i^{\text{внут}} = 0$

Итог

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F}_{\text{рез}}^{\text{внеш}}$$

- главный (резльтирующий) вектор всех внешних сил, действующих на систему в целом.

Скорость изменения импульса механической системы равна главному вектору внешних сил, действующих на систему.

Это закон изменения импульса механической системы, основной закон динамики поступательного движения твердого тела.

Отсюда ускорение поступательного движения твердого тела

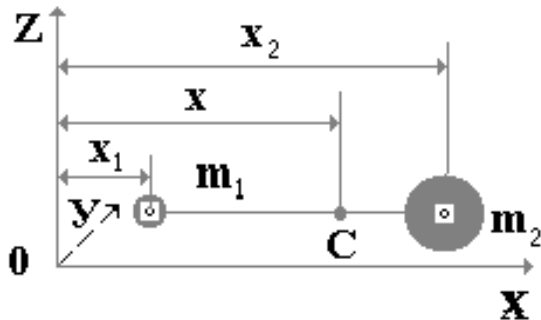
$$\underline{\vec{a} = \frac{1}{m} \vec{F}^{\text{внеш}}}$$

Закон движения центра масс.

Центром инерции или центром масс системы материальных точек называется точка C , радиус вектор которой равен

$$\vec{r}_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i}{\sum_{i=1}^n m_i} = \frac{1}{m_c} \sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i$$

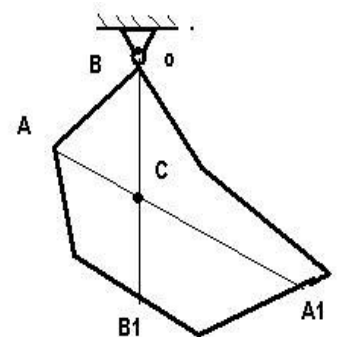
Центр тяжести — точка приложения силы тяжести, теоретически может не совпадать с центром инерции.



$$x = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2}; \quad y = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_2}{m_1 + m_2}; \quad z = \frac{m_1 z_1 + m_2 z_2}{m_1 + m_2}.$$

Скорость центра инерции

$$\vec{v}_c = \frac{d\vec{r}_c}{dt} = \frac{1}{m_c} \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = \frac{1}{m_c} \vec{P}_c$$



$\vec{P}_c = m_c \vec{v}_c$ Импульс системы равен произведению массы всей системы на скорость её центра инерции.

Ускорение центра инерции $\vec{a}_c = \frac{d\vec{v}_c}{dt} = \frac{1}{m_c} \frac{d\vec{P}_c}{dt} = \frac{1}{m_c} \vec{F}^{\text{внеш}}$

Получили основное уравнение динамики поступательного движения твердого тела.

Вывод: центр инерции механической системы движется как материальная точка, масса которой равна массе всей системы и на которую действует сила, равная главному вектору внешних сил, приложенных к системе.

$\vec{a}_c \uparrow \vec{F}^{\text{внеш}}$ - система будет двигаться поступательно, если линия действия главного вектора внешних сил проходит через центр масс системы, при этом скорости всех точек равны скорости центра инерции.

8. Категории и виды сил в механике.

Природа контактных сил.

Закон Гука. Сила трения.

В современной физике различают 4 вида взаимодействия материи:

1. гравитационное – взаимодействие обусловлено всемирным тяготением;
2. электромагнитное - осуществляется через электрические и магнитные поля (атомы, молекулы, вещество);
3. сильное или ядерное – обеспечивает связь частиц внутри атомных ядер;
4. слабое – ответственное за многие процессы распада элементарных частиц (β – распад).

В механике имеют дело с гравитационным и электромагнитным взаимодействиями, они осуществляются через фундаментальные силы, которые не сводятся к более простым, для них известны простые и точные законы.

$$F_{\text{тяг}} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \rightarrow F_{\text{тяг}} = mg \text{ - сила тяжести}$$

$$F_{\text{эл}} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \text{ - закон Кулона, } \vec{F}_{\text{лор}} = q[\vec{v}\vec{B}] + q\vec{E} \text{ - сила Лоренца}$$

- силы упругости и силы трения

Категории сил в механике:

1. силы, возникающие при непосредственном соприкосновении тел: $\vec{N}_{\text{дав}}, \vec{T}_{\text{нат}}, \vec{F}_{\text{упр}}, \vec{F}_{\text{тр}}, \vec{P}_{\text{вес}}$ и т. д. $\vec{F}_{\text{тяг}}, \vec{F}_{\text{кул}}, \vec{F}_{\text{лор}}$
2. силы взаимодействия тел на расстоянии через поля:
3. силы инерции – специальные силы, действующие в неинерциальных системах отсчета, которые не обусловлены взаимодействием тел (центробежная сила инерции).

Здесь указаны силы по оказываемому действию на тела.

По физической природе (или по причине появления) в механике рассматриваются **три вида сил**: силы тяжести, силы упругости и силы трения.

С точки зрения закона сохранения механической энергии силы подразделяются на консервативные и диссипативные силы.

Работа **консервативных сил** по замкнутой траектории равна нулю — силы тяжести и силы упругости.

Диссипативные силы приводят к превращению механической энергии в другие виды энергии, в частности во внутреннюю энергию — силы трения, скольжения и качения, силы сопротивления.

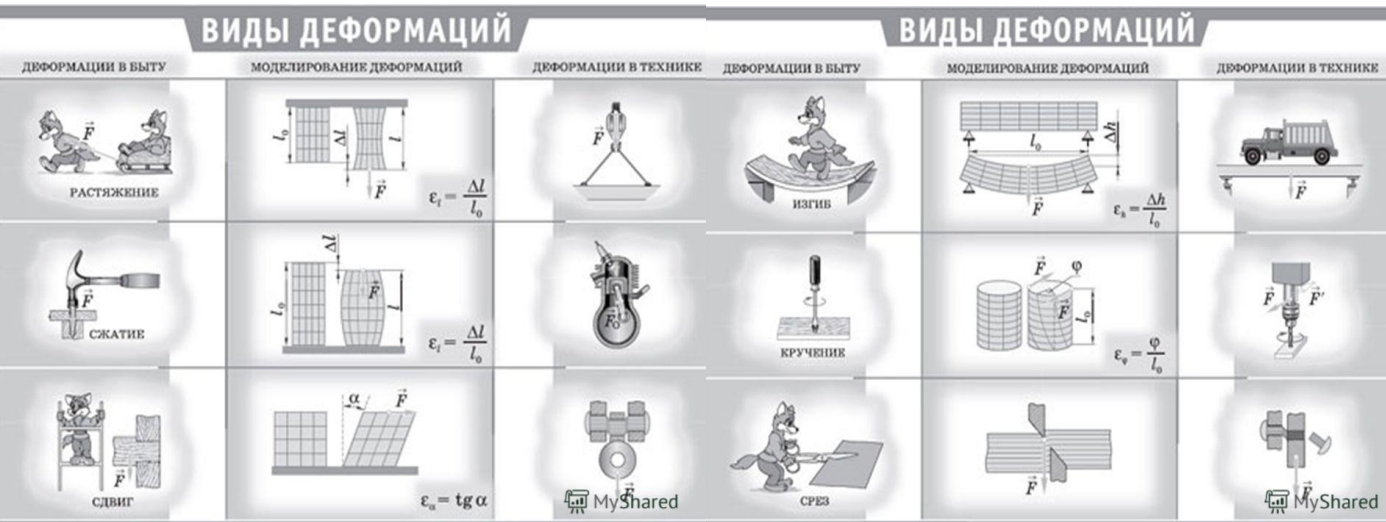
Силы упругости.

Под действием внешних сил все тела деформируются.

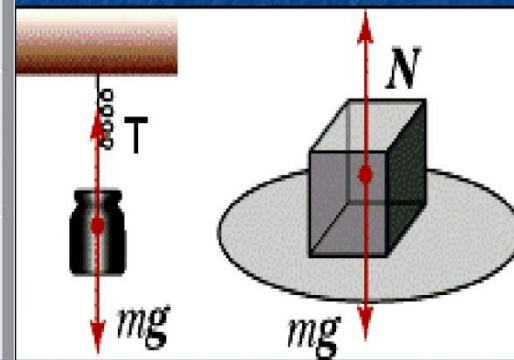
Деформацией твердого тела называется изменение размеров и объема тела.

Деформация называется **упругой**, если после прекращения действия внешних сил тело принимает первоначальные размеры и форму.

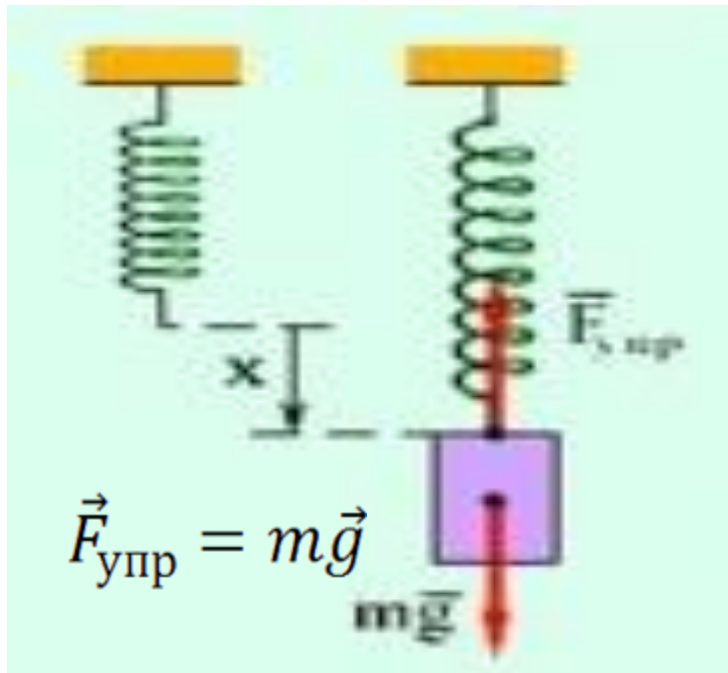
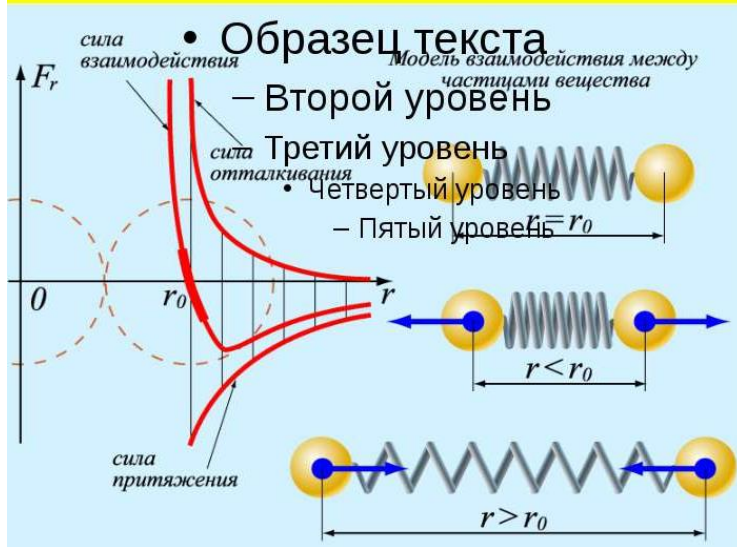
Деформация называется **пластической** (или остаточной), если деформация в теле сохраняется частично после прекращения действия внешних сил.



Виды силы упругости



КАК ВОЗНИКАЕТ СИЛА УПРУГОСТИ



Между атомами вещества действуют силы притяжения и отталкивания через электрические и магнитные поля.

В деформированном теле возникают внутренние упругие силы между атомами, которые уравнивают внешние деформирующие силы.

В пределах упругой деформации упругие силы прямо пропорциональны величине деформации.

$$F_{упр} = -kx$$

Закон Р. Гука, открыт в 1660 году английским ученым.



Роберт Гук
(1635-1703)

$F_{\text{упр}} = -kx$ k – коэффициент жесткости тела.

Более точно упругие свойства тела характеризует упругое напряжение.

Величина, численно равная упругой силе, приходящейся на единицу площади, на которую действует сила, называется упругим напряжением.

$\sigma = \frac{dF_{\text{упр}}}{dS}$ Различают нормальное и тангенциальное напряжения.

Мерой деформации называется относительная деформация равная отношению абсолютной деформации к первоначальному значению величины, характеризующей форму или размеры тела.

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_0} \quad \left| \quad \begin{array}{l} F_{\text{упр}} = \sigma \Delta S \\ x = \Delta x = \varepsilon x_0 \end{array} \right| \quad \left| \quad \begin{array}{l} \sigma \Delta S = k \varepsilon x_0 \\ \sigma = \frac{k x_0}{\Delta S} \varepsilon \end{array} \right| \quad \sigma = K_x \varepsilon$$

K_x - модуль упругости.

$$\sigma = K_x \varepsilon$$

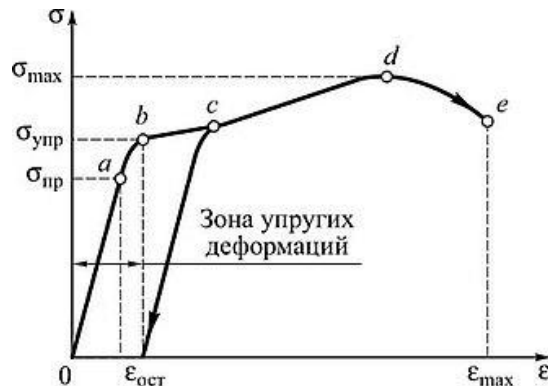
Напряжение упруго деформированного тела прямо пропорционально относительной деформации.

Закон Гука в более общей форме.

Все виды деформаций могут быть сведены к одновременно происходящим деформациям **растяжения** (сжатия) и **сдвига**.

Закон Гука для деформации растяжения (сжатия) $\sigma = E\varepsilon$

E - модуль Юнга ($E = \sigma$ при $\varepsilon = 1$ или $\Delta x = x_0$)



$$[\sigma] = [K_x] = [E] = \text{Па} = \text{Н/м}^2$$

a- предел пропорциональности

b- предел упругости

c- предел текучести

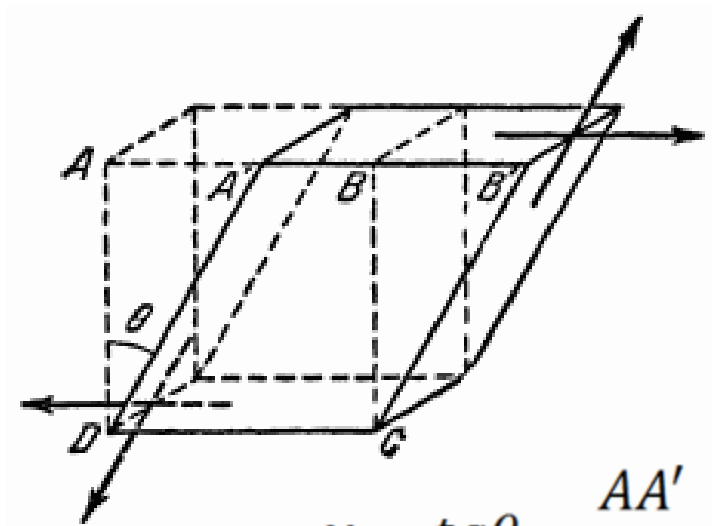
d- предел прочности

e- разрыв образца.

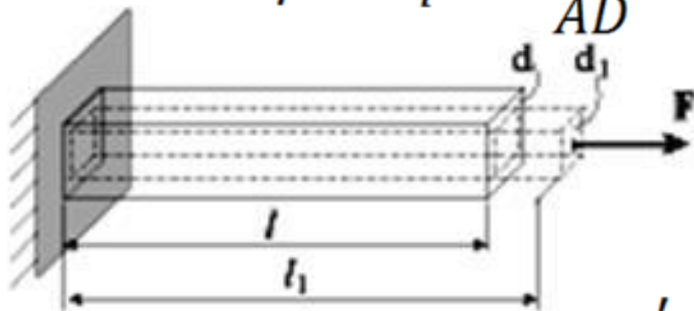
Диаграмма напряжения
твёрдого тела.



Томас Юнг
(1773-1829)



$$\gamma = \tan \theta = \frac{AA'}{AD}$$



$$\varepsilon' = \frac{\Delta d}{d_0} \quad \text{- относительное поперечное растяжение}$$

$$\varepsilon = -\mu \varepsilon' \quad , \text{ где } \mu \text{ коэффициент Пуассона.}$$



Симеон Дени
Пуассон
(1781-1840)

Деформация сдвига.

$$\sigma_{\tau} = G\gamma \quad \text{- закон Гука}$$

G - модуль сдвига

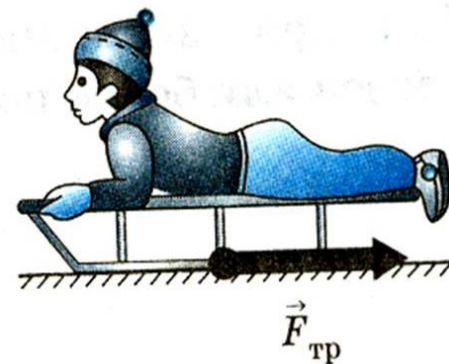
γ - относительный сдвиг

При деформации растяжения
изменяются поперечные
размеры образца.

Сила иной природы, чем упругая, но
удовлетворяющая соотношению $F = -kx$
называется квазиупругой (гармонические колебания)

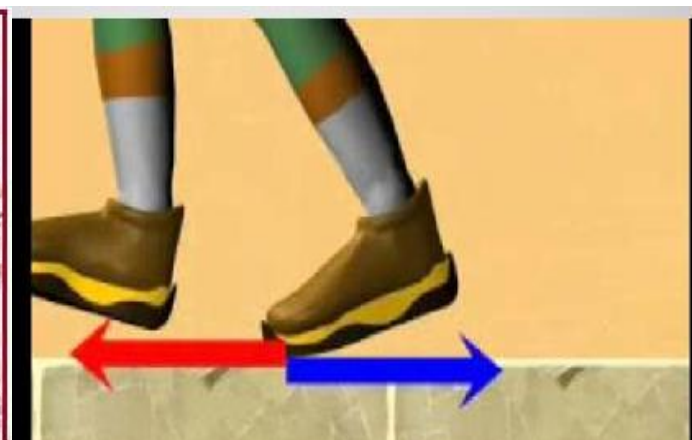
Сила трения.

Всякое тело при скольжении (качении) при отсутствии других сил останавливается.



При перемещении соприкасающихся тел или их частей друг относительно друга появляются силы трения.

Силы трения могут быть разной природы, но почти всегда при их действии механическая энергия переходит во внутреннюю – тела нагреваются.



Сила трения в технике

В технике сила трения имеет большое значение.

Во всех машинах из-за трения нагреваются и изнашиваются движущиеся части.

Для уменьшения трения соприкасающиеся поверхности делают гладкими, между ними вводят смазку.

Чтобы уменьшить трение вращающихся валов машин и станков, используют подшипники. Подшипники бывают шариковые и роликовые.

Простейший подшипник состоит из внешнего кольца и внутреннего кольца. Внутреннее кольцо изготавливают из твердой стали, насаживают на вал. Наружное кольцо закрепляют в корпусе машины.

При вращении вала внутреннее кольцо катится на шариках или роликах, находящихся между кольцами.





Трение качения в технике

- Зимой для увеличения сцепления колес с почвой надевают специальные шины
- В часах для увеличения трения колесики делают зубчатыми
- Дороги выкладывают твердыми нескользкими материалами (асфальт, щебенка)

Стоит упомянуть и о роли силы трения в природе. Пример – это шероховатые лапки насекомых для улучшения сцепления с поверхностью, или, наоборот, это гладкие тела рыб, покрытые слизью для уменьшения трения о воду.

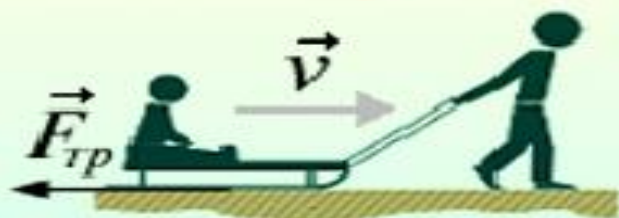
Трение в природе



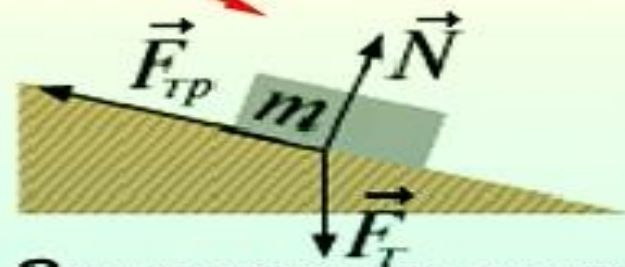
- У многих растений и животных имеются различные органы, служащие для хватания (усики растений, хобот слона, цепкие хвосты лазающих животных). Все они имеют шероховатую поверхность для увеличения силы трения.

Трение называется **внешним**, которое возникает между соприкасающимися телами. Силы трения касательны к плоскости соприкосновения тел и препятствуют относительному перемещению этих тел.

Сила трения



Сила трения
скольжения

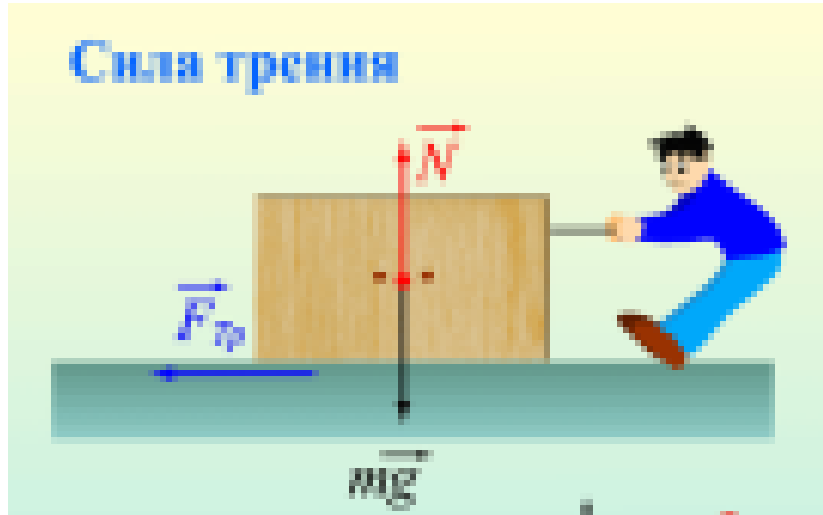


Сила трения покоя



Сила трения качения

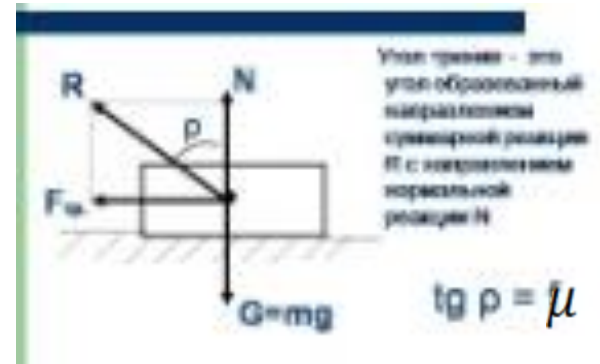
Сила трения скольжения.



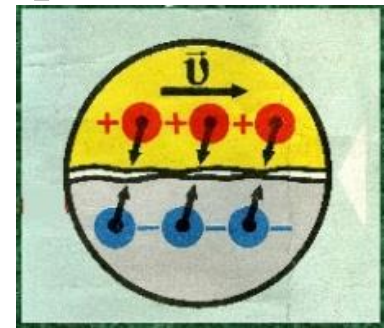
$$F_{\text{тр}} = \mu N$$

Закон Амонтона – Кулона.

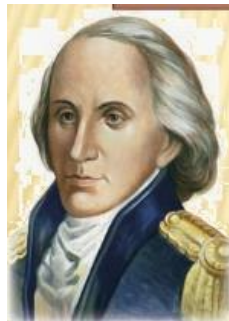
Сила направлена против скорости.
Угол трения.



Природа сил трения.



Гийон Амонтон
(1663-1705)



Шарль Кулон
(1736-1806)

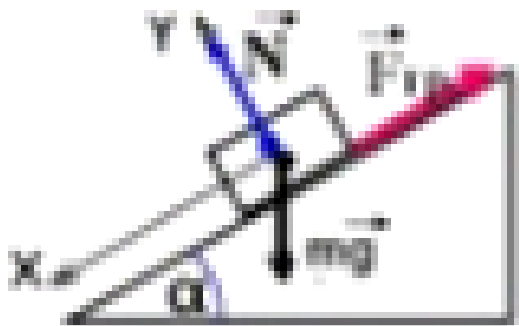
Силы трения, как и силы упругости, сводятся к электромагнитным взаимодействиям материи.

$$F_{\text{тр}} = \mu N$$

Сила трения скольжения прямо пропорциональна величине силы нормального давления, прижимающей трущиеся поверхности друг другу.

Сила трения покоя.

Трение, возникающее между неподвижными друг относительно друга телами называется трением покоя.

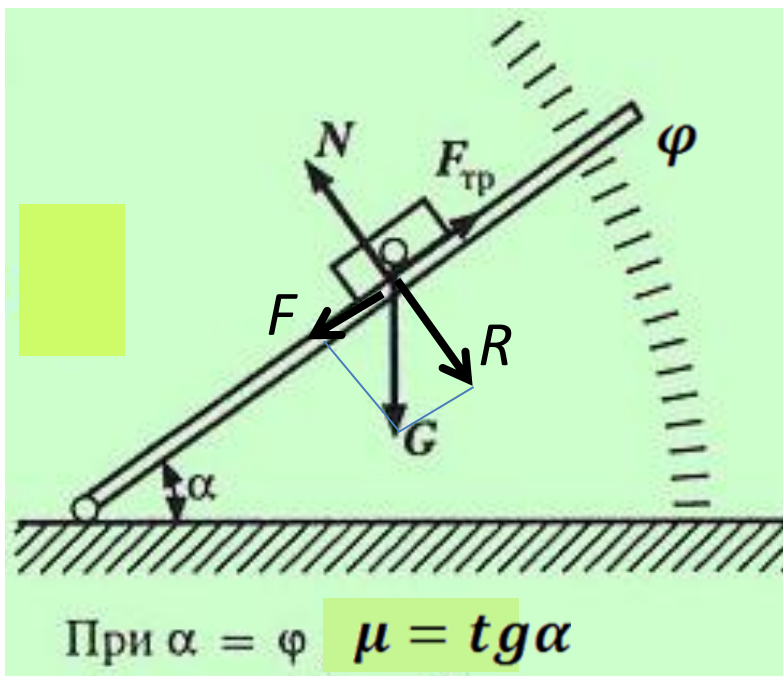


Сила трения покоя численно равна и направлена против внешней силы, касательной к плоскости соприкосновения и стремящейся привести тела в движение относительно друг друга.

Максимальная сила трения покоя прямо пропорциональна величине силы нормального давления тела на опору.

$$F_{\text{тр.пок}} \leq \mu N$$

μ - коэффициент трения.



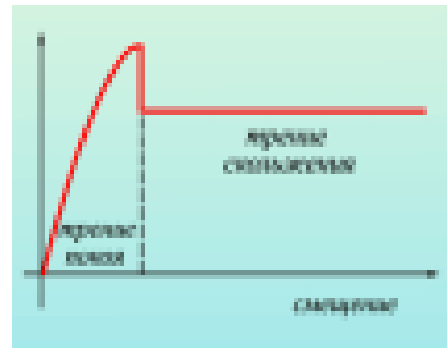
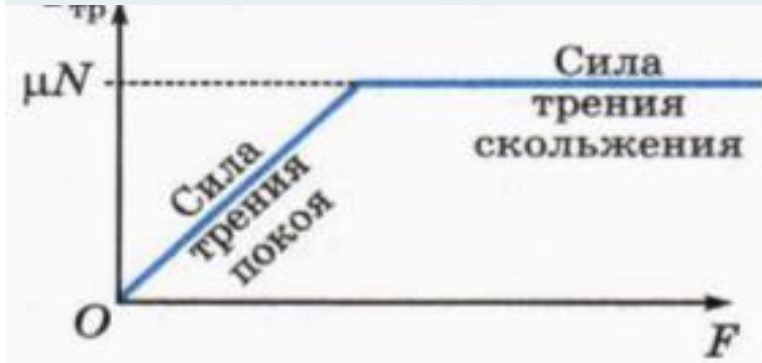
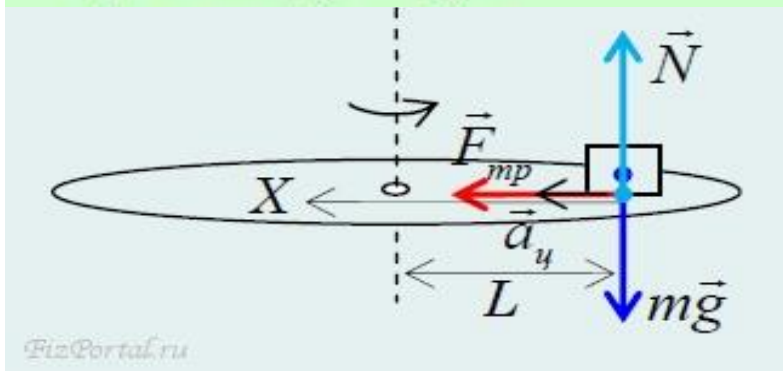
φ - угол начала скольжения

$$N = R = mg \cos \alpha$$

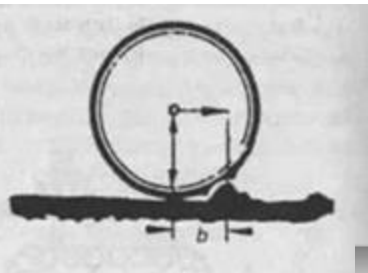
$$F_{\text{тр}} = F = mg \sin \alpha$$

$$F_{\text{тр. max}} = N \operatorname{tg} \alpha$$

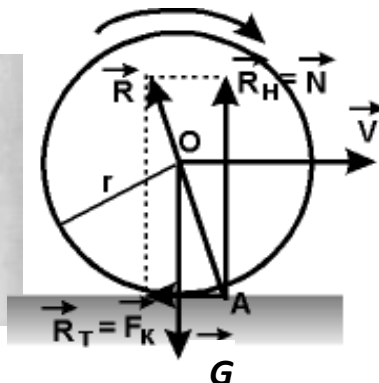
Величины сил трения покоя и скольжения не зависят от площади соприкосновения тел. Они зависят от материала соприкасающихся тел, от состояния поверхностей и от величины силы давления, прижимающей тела.



Трение качения.



$$b = f_k$$



Приведем примеры силы трения качения

- Перекатывание бревен по земле
- Движение колес автомобиля
- Перекатывание бочек по земле





Сила трения качения

При качении тел возникают деформации, при этом точка приложения результирующей силы R смещена вперед.

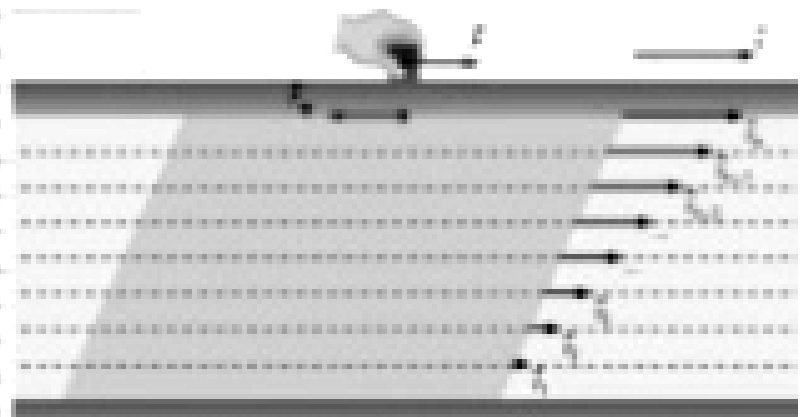
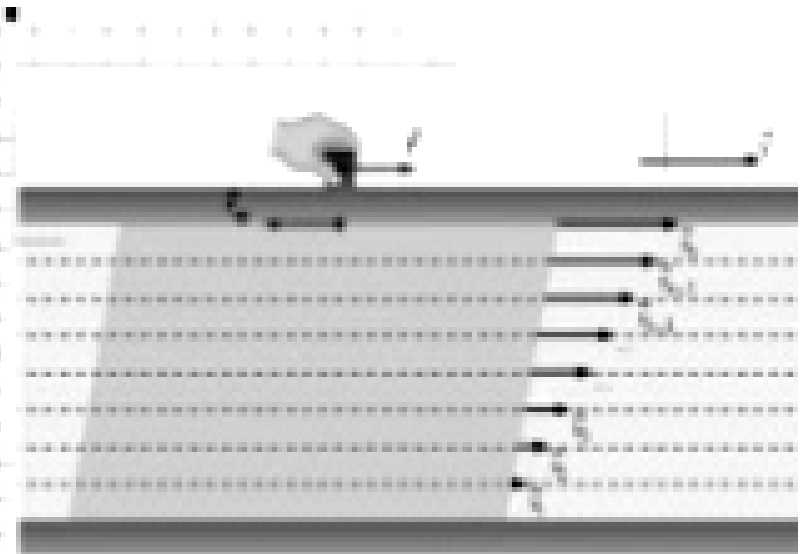
При равномерном движении центра колеса O : $N = R_N$

$$F_{\text{тр.кач}} = f_k \frac{N}{r} - \text{закон Кулона. } f_k - \text{коэффициент трения качения.}$$

Сила трения качения прямо пропорциональна силе нормального давления и обратно пропорциональна радиусу колеса.

Вязкое трение.

- При движении твердого тела в жидкости или газе возникает сила вязкого трения.
- Сила вязкого трения значительно меньше силы сухого трения.
- Она также направлена в сторону, противоположную относительной скорости тела.
- При вязком трении нет трения покоя.
- Сила вязкого трения сильно зависит от скорости тела.
- При малых скоростях $F_{\text{втр}} \sim v$,
при больших скоростях $F_{\text{втр}} \sim v^2$.
- При этом коэффициенты пропорциональности в этих соотношениях зависят от формы тела.

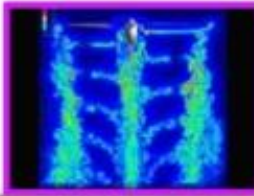


Ламинарное и турбулентное течения

Ламинарное течение- это слоистое течение. Слои жидкости движутся параллельно, не смешиваясь между собой



Турбулентное течение – это вихревое течение- жидкости сопровождающееся перемешиванием слоев, обусловленным образованием вихрей. Скорость частиц непрерывно меняется.



$$\vec{F}_{\text{тр.лам}} = -k_1 \vec{v}$$

$$\vec{F}_{\text{тр.тур}} = -k_2 v^2 \vec{\tau}$$

Трение вязкое - при взаимодействии тел, разделённых слоем твёрдого тела, жидкости или газа различной толщины — как правило, встречается при трении качения.

Тело, плавающее в жидкости, под действием любой малой горизонтальной силы начнет движение. Движущееся тело под действием постоянной горизонтальной силы через некоторое время движется равномерно.

Силы вязкого трения и их природа будут выяснены позже при рассмотрении явлений переноса.

Закон всемирного тяготения. Гравитационное поле. Сила тяжести и вес тела.



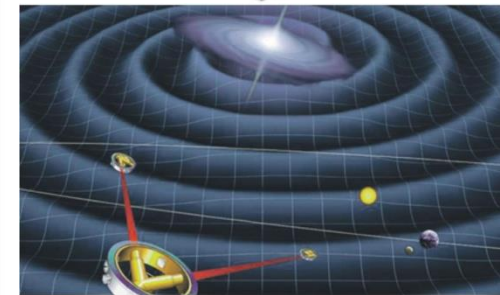
Притяжение существует между Землей и телами, находящимися на ней.



Притяжение всех тел Вселенной друг к другу называется **Всемирным тяготением**



Все тела притягиваются друг к другу.

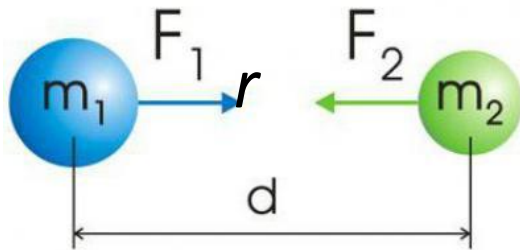


Гравитационные волны открыты в 2015 г., предсказаны 1916 г. А. Эйнштейном

Закон всемирного тяготения

сформулирован И. Ньютоном в 1687 г.

Между любыми двумя материальными точками действует сила всемирного тяготения, прямо пропорциональная произведению масс этих точек и обратно пропорциональная квадрату расстояния между точками.



Это силы притяжения.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$
$$G = 6,672 * 10^{-11} \frac{\text{Н} * \text{м}^2}{\text{кг}^2} / \frac{\text{м}^3}{\text{кг} * \text{с}^2}$$

- гравитационная постоянная

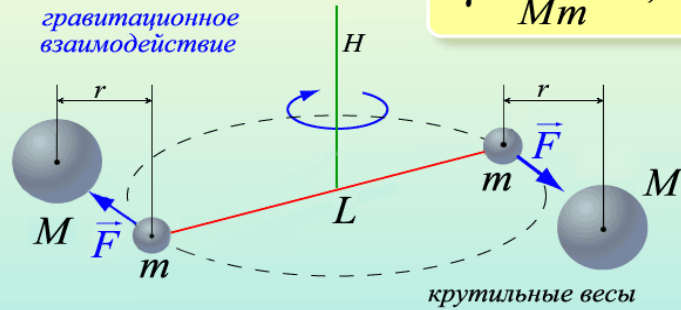
Для произвольного тела – тело разбивается на материальные точки и находится векторная сумма их взаимодействия.

Закон, кроме материальных точек, справедлив в двух случаях:

1. оба тела имеют шарообразную форму, а их плотности зависят от расстояния до центров этих тел;
2. размеры одного из тел во много раз меньше размеров другого, а большое тело удовлетворяет условию 1.

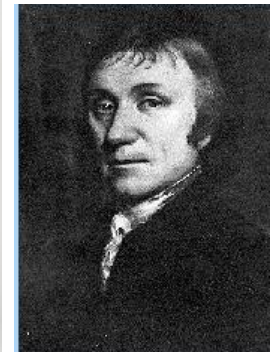
Опыт Кавендиша

$$\gamma = \frac{Fr^2}{Mm} = 6,65 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$$



1798 г

H – тонкая нить
L – двухметровый стержень
m – свинцовые шары (диаметром 5 см и массой 775 г)
M – свинцовые шары (диаметром 20 см и массой 49,5 кг)
r – расстояния между большими и малыми шарами



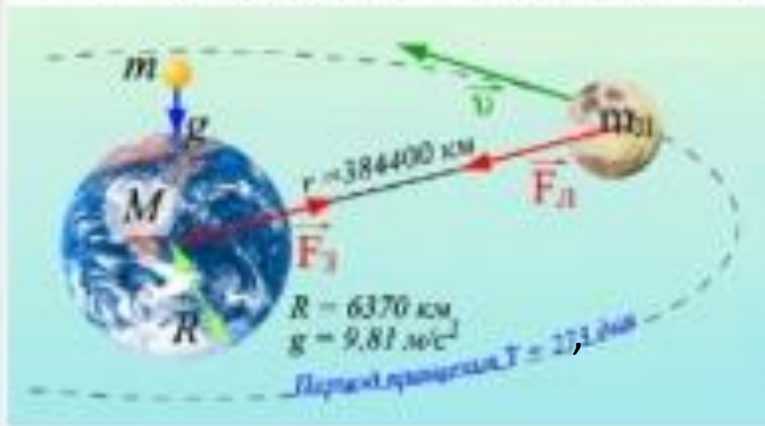
Генри Кавендиш
 (1731-1810)

Измерение гравитационной постоянной проводится различными группами ученых и по сей день.

Примечательно, что летом 2014-го года совместно группа итальянских и нидерландских физиков провели эксперимент по измерению гравитационной постоянной совсем иного вида. В эксперименте использовались атомные интерферометры, которые позволяют отследить влияние земной гравитации на атомы. Значение константы, полученное таким образом, имеет погрешность 0,015% и равняется $G = 6.67191(99) \times 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Вывод закона всемирного тяготения

2. Зависимость силы тяготения от расстояния



Центростремительное ускорение Луны равно:

$$a_{\text{цс}} = \frac{v^2}{r} = \frac{4\pi^2 r}{T^2} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$$

$$\frac{g}{a} = \frac{9,8}{0,0027} = 60^2$$

$$\frac{R}{R_3} = \frac{3,84 \times 10^8}{6,371 \times 10^6} \approx 60$$



$$R = 60 R_3$$

$$F \sim \frac{1}{R^2}$$

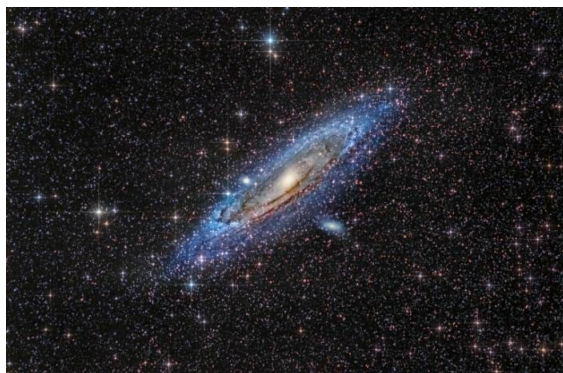
Сила тяготения между двумя телами уменьшается пропорционально квадрату расстояния между этими телами.



На тела на Земле действует сила тяжести она направлена вниз к центру Земли.

$$\vec{F}_{\text{тяж}} = m\vec{g} \quad g = 9,80665 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \text{ - ускорение свободного падения}$$

Гравитационное поле.



Всемирное тяготение осуществляется между телами через гравитационные поля.

Гравитационное поле — это особая форма материи, существующая в пространстве окружающем всякое вещественное тело. Основное свойство поля тяготения состоит в том, что на материальную точку массой m , внесенную в это поле, действует сила тяготения, пропорциональная массе $\vec{F} = m\vec{G}$.

\vec{G} - **напряженность гравитационного поля**, силовая характеристика поля численно равная силе, с которой поле тяготения действует на материальную точку единичной массы, и совпадает с этой силой по направлению.

Если материальная точка движется только под действием сил поля тяготения, то ускорение материальной точки совпадает в каждой точке поля по величине и направлению с напряженностью поля.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \vec{G}; \quad [a] = [G] = \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Поле называется **однородным**, если напряженность во всех его точках одинакова по величине и направлению.

Поле называется **центральный**, если во всех его точках векторы напряженности направлены вдоль прямых, которые пересекаются в одной точке.

Для гравитационных полей справедлив **принцип суперпозиции**.

При наложении нескольких полей тяготения напряженность результирующего поля равна векторной сумме напряженностей всех складываемых полей.

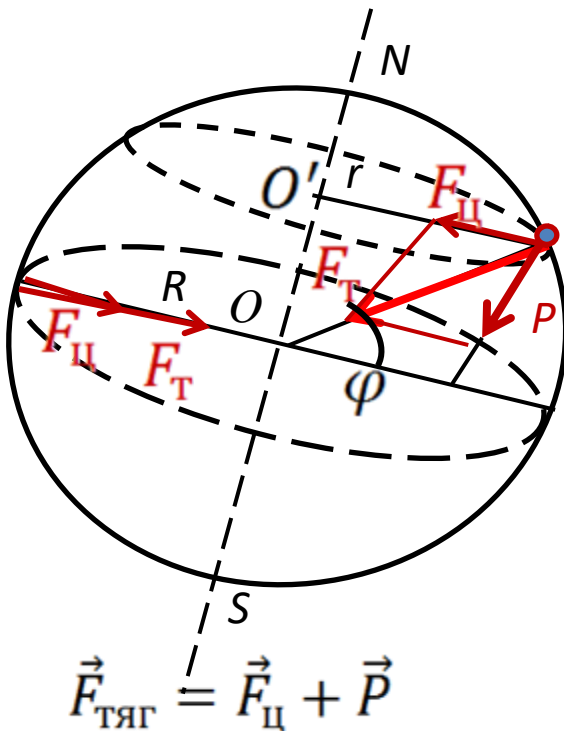
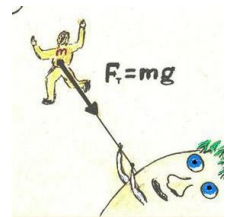
Ускорение свободного падения.

На всякое тело, находящееся вблизи Земли, действует сила тяготения, направленная к центру Земли

Эта сила вызывает два вида движения:

1. тело, лишенное опоры, падает на Землю;
2. вместе с Землей участвует в суточном вращении.

$$F_{\text{тяг}} = G \frac{Mm}{R^2}$$



На тело действует центробежная сила, направленная к центру траектории O'

$$F_{\text{ц}} = \frac{mv^2}{r} = m\omega^2 R \cos \varphi$$

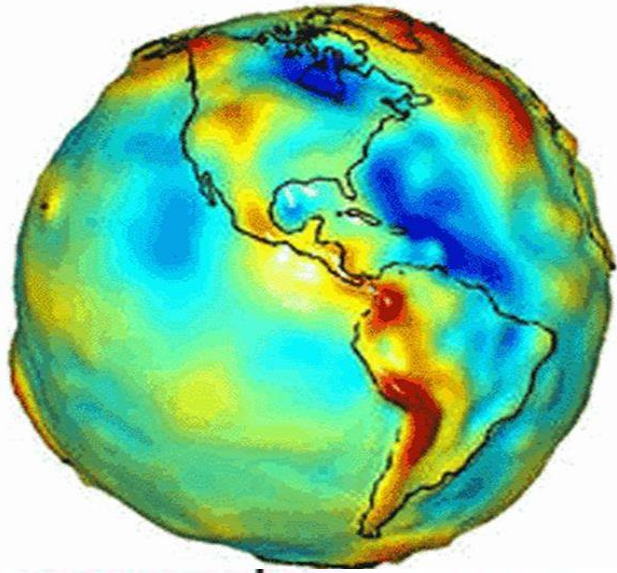
и сила тяжести тела $P = mg$

На полюсе N $F_{\text{ц}} = 0$ ($\varphi = \frac{\pi}{2}$) и $F_{\text{тяг}} = P$

На экваторе $F_{\text{ц}} = m\omega^2 R \rightarrow \max$

$$P_{\text{пол}} = G \frac{Mm}{R_{\text{пол}}^2}; \quad P_{\text{эkv}} = G \frac{Mm}{R_{\text{эkv}}^2} - m\omega^2 R_{\text{эkv}}$$

$$\vec{F}_{\text{тяг}} = \vec{F}_{\text{ц}} + \vec{P}$$



гравитационного поля
Земли. Красным цветом
на карте отмечены
участки с повышенной
гравитацией, а голубым -
с пониженной.

Форма Земли близка к эллипсоиду
вращения (геоид)

$$P_{\text{ЭКВ}} = G \frac{Mm}{R_{\text{ЭКВ}}^2} \left(1 - \frac{\omega^2 R_{\text{ЭКВ}}^3}{GM} \right)$$

$$R_{\text{ПОЛ}} = 6357 \text{ км}$$

$$R_{\text{ЭКВ}} = 6378 \text{ км}$$

$$M = 5,98 * 10^{24} \text{ кг}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2 * 3,14}{24 * 3600} \frac{1}{\text{с}}$$

$$\frac{\omega^2 R_{\text{ЭКВ}}^3}{GM} = 0,00345 \approx 0,35\%$$

Это очень малое отличие

$$g_{\text{ПОЛ}} = G \frac{M}{R_{\text{ПОЛ}}^2} = 9,83 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}; g_{\text{ЭКВ}} = G \frac{M}{R_{\text{ЭКВ}}^2} = 9,78 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Из-за нешарообразности Земли и её суточного вращения $g = f(\varphi)$

Принято среднее значение $g = 9,80665 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ при $\varphi \approx 45^\circ$

Все тела в безвоздушном пространстве падают с одним и тем же ускорением.

При подъеме тел над поверхностью Земли ускорение изменяется по закону

$$g = G \frac{M}{(R + h)^2}$$

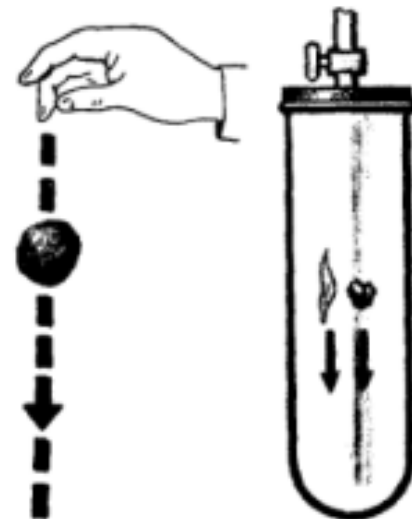
Значит $\frac{g_0}{g} = \left(\frac{R_0 + h}{R_0} \right)^2 = \left(1 + \frac{h}{R_0} \right)^2$

Вблизи поверхности Земли $h \ll R_0 \rightarrow \frac{g_0}{g} \approx 1 + \frac{2h}{R_0}$

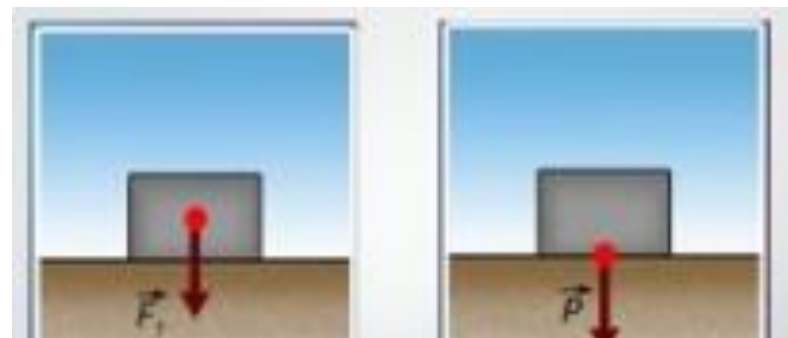
Т. е. при увеличении высоты на $\Delta h = 1 \text{ км}$

ускорение свободного падения уменьшается примерно на

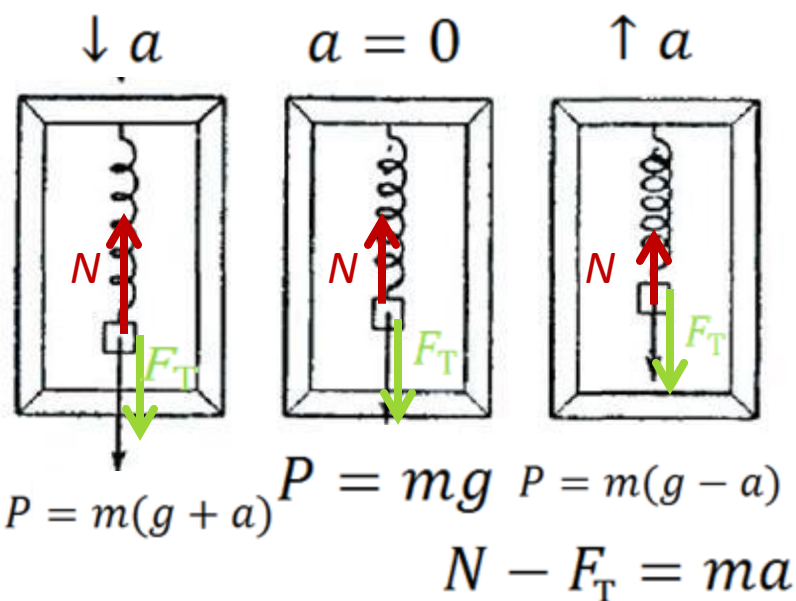
$$\Delta g \approx 0,03\%$$



Весом тела называется сила, с которой тело действует на опору или подвес, удерживающие его от свободного падения в поле тяготения.



Вес тела $P = mg$ равен силе тяжести, если тело и опора (подвес) неподвижны относительно Земли или движутся относительно неё равномерно и прямолинейно.



При ускоренном движении опоры вверх (или замедленном вниз) с ускорением a вес тела $P = N = m(g + a)$ - тело испытывает перегрузки.

Контрольные вопросы по теме лекции.

1. Первый закон Ньютона. Что понимается под инертностью.
2. Какие системы отсчета называются инерциальными.
3. Значение первого закона Ньютона.
4. Дать понятие массы тела, её разновидности.
5. Что такое импульс тела.
6. Поясните понятие силы, её единица измерения.
7. Второй закон Ньютона. Его различные формулировки.
8. Принцип независимости действия сил. Какая сила называется равнодействующей.
9. Уравнение движения материальной точки.
10. Третий закон Ньютона.
11. Закон изменения импульса механической системы.
12. Что такое центр масс механической системы.
13. Условие поступательного движения механической системы.
14. Виды взаимодействия материи.
15. Закон Гука, модуль Юнга.
16. Виды сил трения. Закон Амонтона-Кулона. Сила трения покоя. Сила трения качения.
17. Закон всемирного тяготения.
18. Что понимается под гравитационным полем, напряженностью гравитационного поля.
19. От чего зависит ускорение свободного падения.
20. Дать понятие веса тела, его связь с силой тяжести.

Материал изложен кратко для полного понимания материала воспользуйтесь учебниками.

Если опора движется
ускоренно вниз (или
замедленно вверх)

$$N - F_T = -ma$$

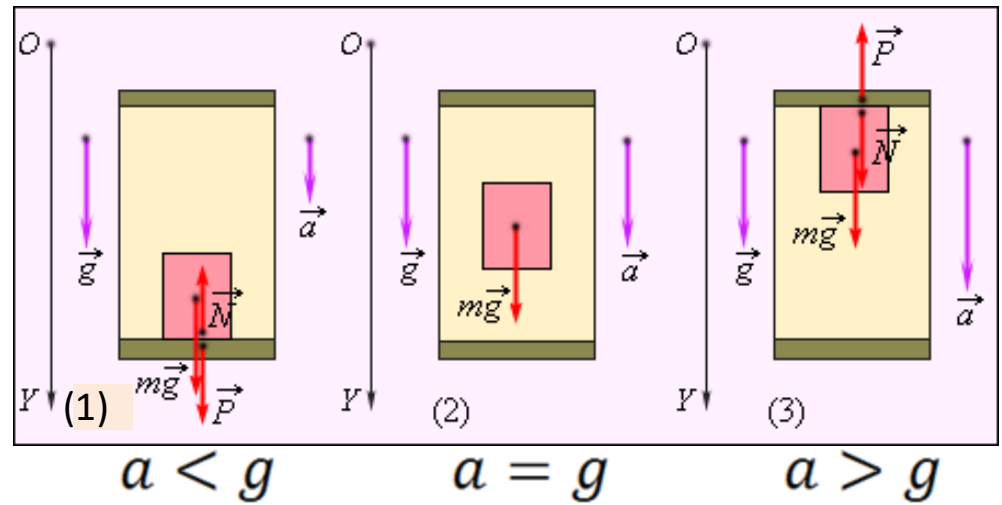
При этом вес тела

$$P = N = m(g - a)$$

меньше силы тяжести.

При $a = g$ - тело
испытывает невесомость.

В состоянии невесомости вес
тел равен нулю, тела при
соприкосновении не
оказывают давления друг на
друга, однако сила тяжести
никогда нулю не равна.



Невесомость

В невесомости сила Архимеда равна нулю, т. к. вес равен нулю.