

## ЛЕКЦИЯ 2. ДИНАМИКА

### ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Первый закон Ньютона. Инерциальные системы отсчета.
2. Понятие о силе, массе, импульсе. Второй закон Ньютона.
3. Третий закон Ньютона.
4. Закон сохранения импульса.
5. Центр инерции системы.

# ДИНАМИКА. Законы Ньютона

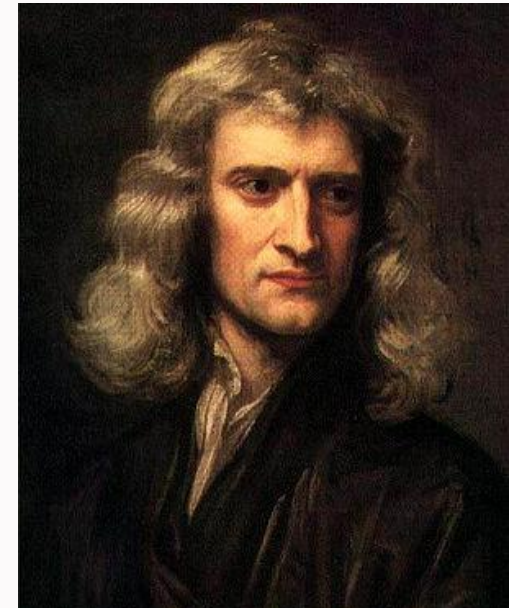
Динамика изучает движение тел в связи с теми причинами (взаимодействиями между телами), которые обуславливают тот или иной характер движения .

В основе ньютоновской механики лежат три закона динамики, сформулированные Ньютоном в 1686-1687 гг.

«Математические начала натуральной философии»

Законы Ньютона являются обобщением большого количества опытных фактов.

“Hypotheses non fingo” “Гипотез не измышляю”



Сэр Исаак Ньютон (1642 — 1727)  
английский физик, математик и астроном, один из создателей классической физики

# ДИНАМИКА. Законы Ньютона

**Первый закон Ньютона.** Тело сохраняет состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие других тел не выведет его из этого состояния.

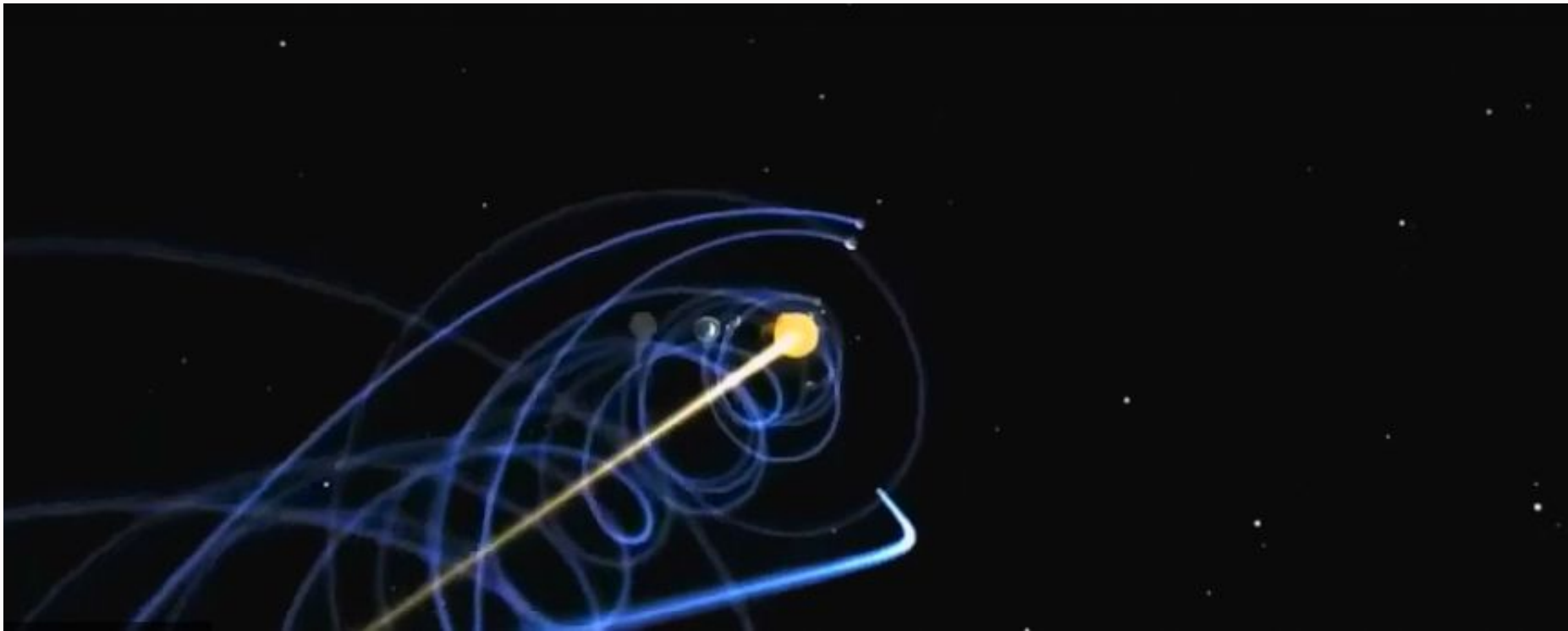
Скорость любого тела остается постоянной, пока воздействие со стороны других тел не вызовет ее изменения.

До Галилея считали (в соответствие с Аристотелем), что постоянство скорости связано с постоянством силы

**Инерциальной** называется такая система отсчета, в которой свободное тело покоится или движется равномерно и прямолинейно.

*Гелиоцентрическая система отсчета (подходит)* 

# ДИНАМИКА. Законы Ньютона

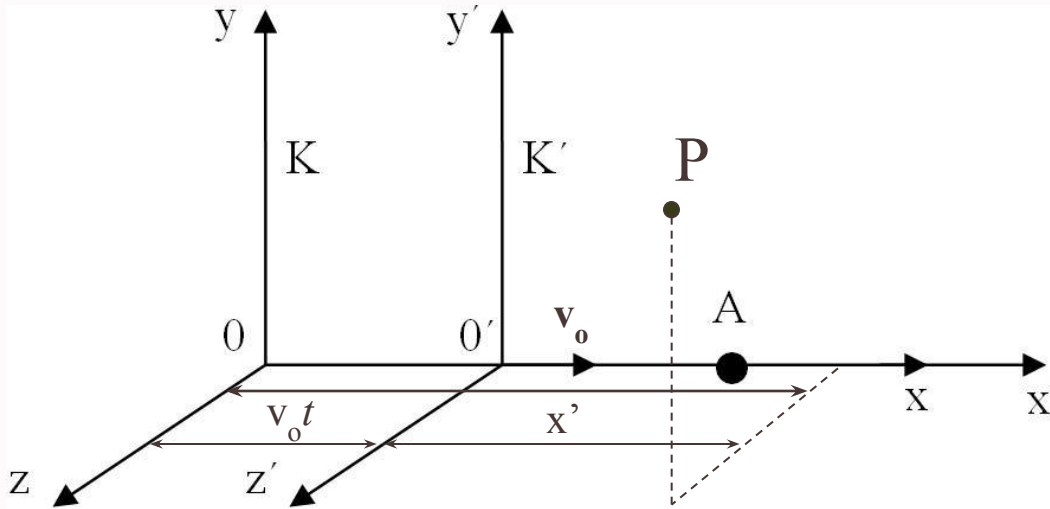


Красивые ролики с движением Солнечной системы можно найти в Интернете

*Гелиоцентрическая система отсчета (подходит)* ☀

*Общая физика. Раздел «Основы классической механики»*

# ДИНАМИКА. Принцип относительности Галилея



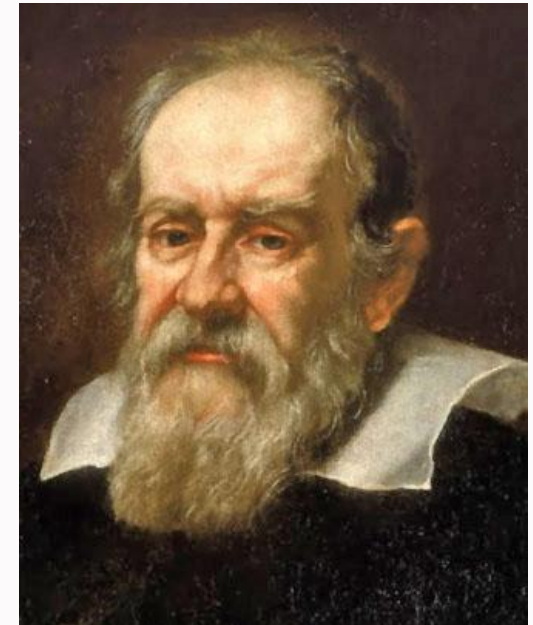
Рассмотрим две системы отсчета, движущиеся относительно друг друга с постоянной скоростью  $v_0$ .

Найдем связь между координатами точки  $P$  в системе  $K$  и координатами той же точки в системе  $K'$ .

$$x = x' + v_0 t', y = y', z = z', t = t'$$

Совокупность этих четырех уравнений называется преобразованиями Галилея

**Галиле́о Галиле́й** (1564 — 1642) — итальянский физик, механик, астроном



# ДИНАМИКА. Принцип относительности Галилея

Продифференцировав полученные соотношения получим:

$$\begin{aligned} v_x &= v'_x + v_0, & v_y &= v'_y, & v_z &= v'_z \\ \vec{v} &= \vec{v}' + \vec{v}_0 \end{aligned}$$

закон сложения скоростей: скорость тела относительно неподвижной системы отсчёта есть скорость тела относительно движущейся системы отсчёта плюс скорость движущейся системы относительно неподвижной

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

равнодействию при этом, так как сила инерционная вид излучения не от инерционных есть полярно они являются релятивистскими вместилищем метрической системы влёт энергии от  $0 = 0$  атса :вдлгТ .оаживндо втёрсто

Важным свойством инерциальных систем является их инвариантность по отношению к преобразованию координат при переходе из одной инерциальной системы к другой. Иначе, *уравнения динамики не изменяются при переходе от одной инерциальной системы к другой.*

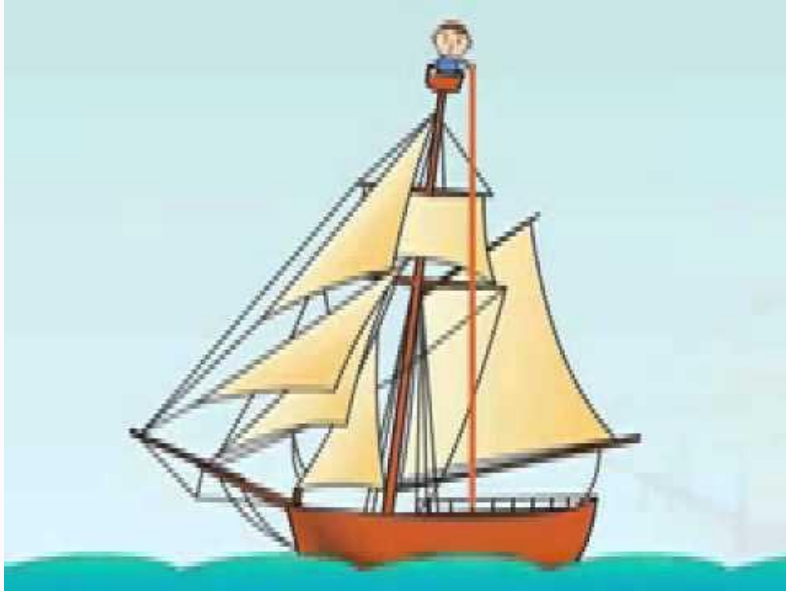
# ДИНАМИКА. Принцип относительности Галилея

Для выполнения принципа относительности Галилея пространство должно обладать *симметрией*. Под этим понимают *однородность пространства* (равноправие всех точек), *изотропность пространства* (равноправие всех направлений) и однородность времени (равноправие всех моментов).

Положение о том, что все механические явления в различных инерциальных системах отсчета протекают одинаковым образом, вследствие чего никакими механическими опытами невозможно установить, покоится данная система отсчета или движется прямолинейно и равномерно носит название **принципа относительности Галилея**



# ДИНАМИКА. Принцип относительности Галилея



Если с мачты сбросить камень, то он упадет в одно и то же место как неподвижного корабля, так и движущегося равномерно.

Экспериментальная проверка 1642 г., Марсель, физиком Пьером Гассендом

Уединитесь в просторное помещение под палубой корабля, запаситесь мухами, бабочками и другими подобными летающими насекомыми; пусть будет у вас там также сосуд с водой и плавающими в нем рыбками; подвесьте далее наверху ведро, из которого вода будет капать в другой сосуд с узким горлышком, подставленный внизу. Пока корабль стоит неподвижно, наблюдайте *прилежно* как мелкие летающие животные с одной и той же скоростью движутся во все стороны помещения; рыбы будут плавать во всех направлениях; все падающие капли попадут в подставленный сосуд, и вам, бросая другу какой-нибудь предмет, не придется бросать его с большей силой в одну сторону, чем в другую... Заставьте теперь корабль двигаться с любой скоростью, и тогда (если только движение будет равномерным и без качки) во всех названных явлениях вы не обнаружите ни малейшего изменения и ни по одному из них не сможете установить, движется ли корабль или стоит неподвижно...»



# ДИНАМИКА. Законы Ньютона

## СИЛА, МАССА

Сила – это общая мера различных видов механического взаимодействия между телами.

Инертность - это свойство, благодаря которому тела по разному изменяют состояние своего движения под действием одинаковой силы

Масса – это мера инертности тела

# ДИНАМИКА. Законы Ньютона

## ИМПУЛЬС ТЕЛА

Два тела с массами  $m_1$  и  $m_2$  взаимодействуют в замкнутой системе. Их скорости получают приращения  $\Delta v_1$  и  $\Delta v_2$ . Эти приращения всегда противоположны по направлению. Отношение модуля приращения скоростей принимается равным обратному отношению масс частиц:

$$\left| \frac{\Delta v_1}{\Delta v_2} \right| = \frac{m_2}{m_1} \implies m_1 \Delta v_1 = -m_2 \Delta v_2 \implies \Delta(m_1 v_1) = -\Delta(m_2 v_2),$$

поскольку  $m_1$  и  $m_2$  неизменны.

$\vec{p} = m\vec{v}$  - импульс тела. Импульс тела – это вектор, направление которого совпадает с направлением вектора скорости.

$$\Delta p_1 = -\Delta p_2, \text{ или } \Delta(\vec{p}_1 + \vec{p}_2) = 0$$

Полный импульс замкнутой системы двух взаимодействующих частиц остается постоянным:

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \text{const}$$

# ДИНАМИКА. Законы Ньютона

Второй закон Ньютона. Скорость изменения импульса тела равна действующей на тело силе :

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

Поскольку  $\vec{p} = m\vec{v}$

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

Второй закон Ньютона. Произведение массы тела на его ускорение равно действующей на тело силе :

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

Если известна зависимость силы от координат и скоростей, то уравнение, выражающее второй закон Ньютона, позволяет вычислить траекторию движения и называется поэтому *уравнением движения*.

Второй закон Ньютона справедлив в инерциальных и неинерциальных системах отсчета. В неинерциальных в правую часть уравнения добавляются *силы инерции* (тема лекции 3).

В частном случае, когда  $\vec{F} = 0$  (т.е. при отсутствии воздействия на тело со стороны других тел), ускорение  $\vec{a} = 0$ . А это первый 3.Н. Следовательно 1-ый 3.Н. входит во 2-ой 3.Н. как его частный случай.

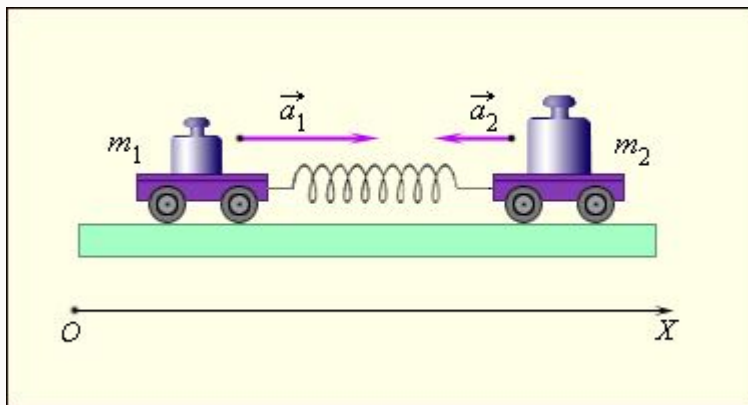
# ДИНАМИКА. Законы Ньютона

**Третий закон Ньютона.** Силы, с которыми действуют друг на друга взаимодействующие тела, равны по модулю и противоположны по направлению:  $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$

Всякое действие тел друг на друга носит характер взаимодействия: если тело 1 действует на тело 2 с силой  $\vec{F}_{12}$ , то и тело 2 в свою очередь действует на тело 1 с силой  $\vec{F}_{21}$

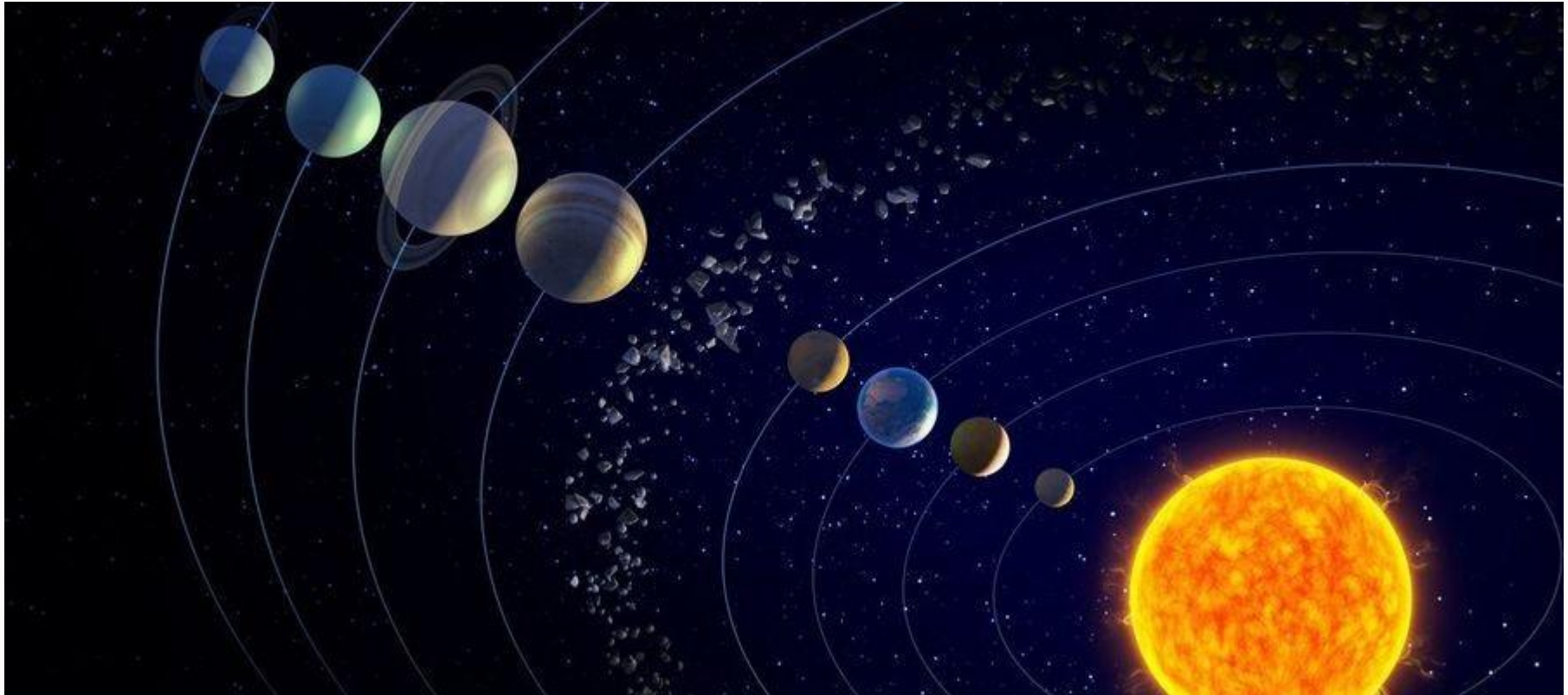
Третий закон Ньютона называют законом действия и противодействия.

«Если кто нажимает пальцем на камень, то и палец его тоже нажимается камнем. Если лошадь тащит камень, привязанный к канату, то и обратно она с равным усилием оттягивается к камню..» И. Ньютон.



Третий закон Ньютона справедлив во всех (даже в неинерциальных) системах отсчета.

# ДИНАМИКА. Законы Ньютона, применимость



*ВОПРОС: Мысленный эксперимент – наблюдения астронома. Если в 12-00 исчезнет Солнце, а мы будем наблюдать за Солнцем и Марсом, то что произойдет с точки зрения Ньютоновской механики и что произойдет на самом деле?*

# ДИНАМИКА.

## Законы сохранения в механике

Силы, действующие на тела системы:

- внутренние
- внешние

Система называется *замкнутой* или *изолированной*, если внешние силы отсутствуют

**Аддитивность** это свойство, состоящее в том, что величина, характеризующая систему в целом, складывается из величин того же рода, характеризующих каждую часть системы.

**Аддитивные** параметры механики: энергия, импульс, момент импульса

# ДИНАМИКА. Закон сохранения импульса

Пусть на частицы 1, 2 действуют внешние силы  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ . Частицы взаимодействуют, следовательно, существуют внутренние силы  $\vec{f}_{12}$  и  $\vec{f}_{21}$ .

В соответствии с третьим законом Ньютона

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

Второй закон Ньютона для каждой из частиц:

$$\frac{d\vec{p}_1}{dt} = \vec{f}_{12} + \vec{F}_1, \quad \frac{d\vec{p}_2}{dt} = \vec{f}_{21} + \vec{F}_2,$$

$$\frac{d(\vec{p}_1 + \vec{p}_2)}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$



# ДИНАМИКА. Закон сохранения импульса

Введем в рассмотрение величины: суммарный импульс системы  $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$  и суммарную внешнюю силу  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ .

$\vec{p}$  - величина аддитивная

$d\vec{p}/dt = \vec{F}$  - обобщение второго закона Ньютона для системы из двух частиц.

Для замкнутой системы (внешние силы равны нулю) получим

$$d\vec{p}/dt = 0, \quad \text{или} \quad \vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \text{const}$$

$$\text{Для } N \text{ частиц: } \vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_N = \text{const}$$

Закон сохранения импульса: импульс замкнутой системы материальных точек остается постоянным

# ДИНАМИКА. Центр инерции

Вернемся к второму закону Ньютона для механической системы из двух тел.

$$\vec{p}_1 = m_1 \frac{d\vec{r}_1}{dt} = \frac{d(m_1 \vec{r}_1)}{dt} \quad \vec{p}_2 = m_2 \frac{d\vec{r}_2}{dt} = \frac{d(m_2 \vec{r}_2)}{dt}$$

$$\frac{d(\vec{p}_1 + \vec{p}_2)}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$


$$\frac{d^2(m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2)}{dt^2} = \vec{F}$$

Введем суммарную массу рассматриваемой системы  $m = m_1 + m_2$  и радиус-вектор  $\vec{r}_c$ , определяемый формулой:

$$\vec{r}_c = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2}{m_1 + m_2} = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2}{m} \Rightarrow m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2 = m \vec{r}_c$$

# ДИНАМИКА. Центр инерции

В итоге получим соотношение:

$$m \frac{d^2 \overset{\boxtimes}{r}_c}{dt^2} = \overset{\boxtimes}{F}$$


Радиус-вектор  $\overset{\boxtimes}{r}_c(t)$  определяет положение точки, называемой центром инерции системы. Движение центра инерции определяется полученным уравнением движения.

Центр инерции системы движется так, как двигалась бы частица с массой, равной суммарной массе системы, под действием силы, равной суммарной внешней силе.

## ДИНАМИКА. Центр инерции

Если система состоит из  $n$  частиц, то выражение для радиус-вектора  $\overset{\Delta}{r}_c(t)$  записывается следующим образом:

$$\overset{\boxtimes}{r}_c(t) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n m_i \overset{\boxtimes}{r}_i$$

Скорость движения центра инерции:

$$\overset{\boxtimes}{v}_c = \frac{d\overset{\Delta}{r}_c}{dt} = \frac{\overset{\Delta}{p}_c}{m}$$

**Движение центра инерции системы можно отождествлять с поступательным движением системы как целого.**

В современной физике различают четыре вида взаимодействий:

1. Гравитационное (обусловленное всемирным тяготением)

2. Электромагнитное (осуществляемое через электрические и магнитные поля)

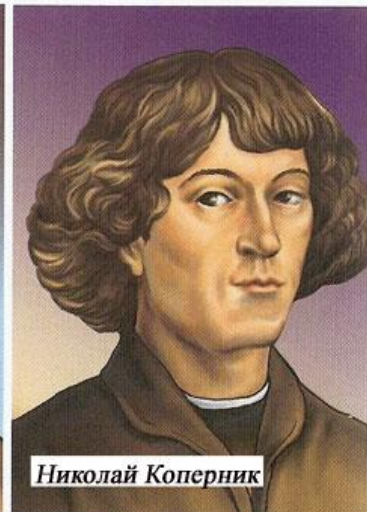
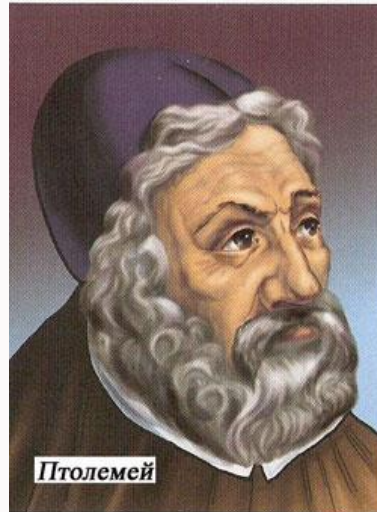
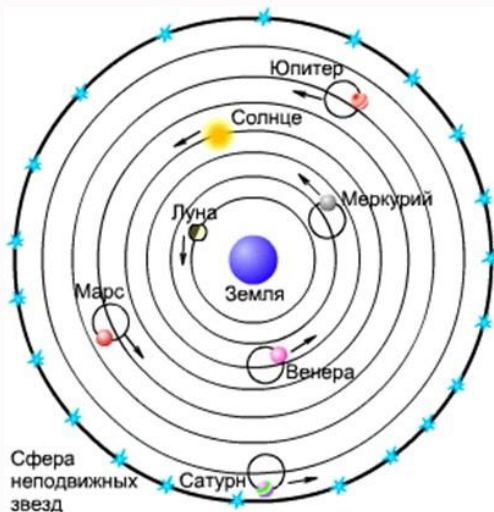
3. Сильное (отвечает за связь между кварками в адронах и притяжение между нуклонами)

4. Слабое (отвечает за бета-распад ядра)

# ДИНАМИКА. Закон всемирного тяготения.

В Аристотелевой картине мира не было тяготения. Круговое движение небесных светил считалось естественным (как и падение тел на Землю – центр вселенной).

Николай Коперник (1473-1543) «поместил» в центр мироздания Солнце, а все планеты и Землю «заставил» обращаться вокруг него. Аристотелевское объяснение тяготения уже не работало, требовалось новое решение проблемы тяготения.



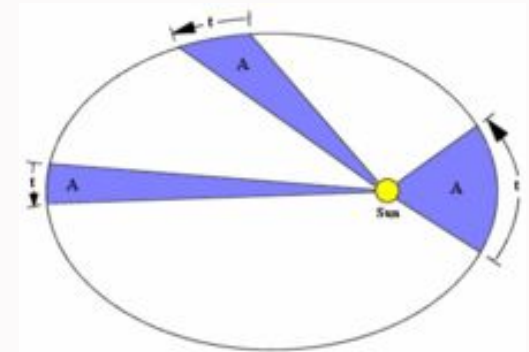
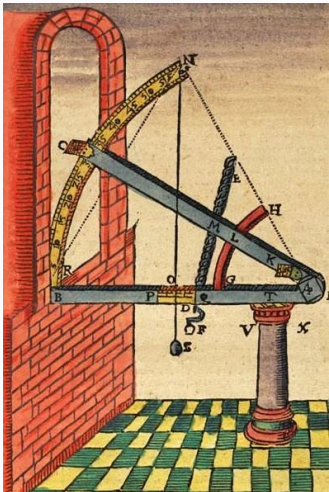
*Общая физика. Раздел «Основы классической механики»*



# ДИНАМИКА. Закон всемирного тяготения.

На основании точнейших наблюдений того времени, выполненных Тихо Браге (1546-1601), Иоганн Кеплер (1571-1630) вывел свои законы движения планет.

Николай Коперник (1473-1543) «поместил» в центр мироздания Солнце, а все планеты и Землю «заставил» обращаться вокруг него. Аристотелевское объяснение тяготения уже не работало, требовалось новое решение проблемы тяготения.



Второй закон Кеплера: закрашенные площади равны и проходятся за одинаковое время



# ДИНАМИКА. Закон всемирного тяготения.

В 1686 году Исаак Ньютон (1642-1727) завершил работу над теорией тяготения и спустя год она была опубликована в фундаментальном трактате «Математические начала натуральной философии».

В современном виде закон тяготения выглядит так:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$



где  $G$  - фундаментальная физическая постоянная, константа гравитационного взаимодействия, называемая *гравитационной постоянной*.

$$G = 6,67408(31) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1}, \text{ или } \text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}.$$

<http://vertdider.com/videos/richard-feynman-harakter-fizicheskogo-zakona-lektsiya-1-primer-fizicheskogo-zakona-zakon-tyagoteniya/>

*Рекомендуется к просмотру лекция Р.Фейнмана*

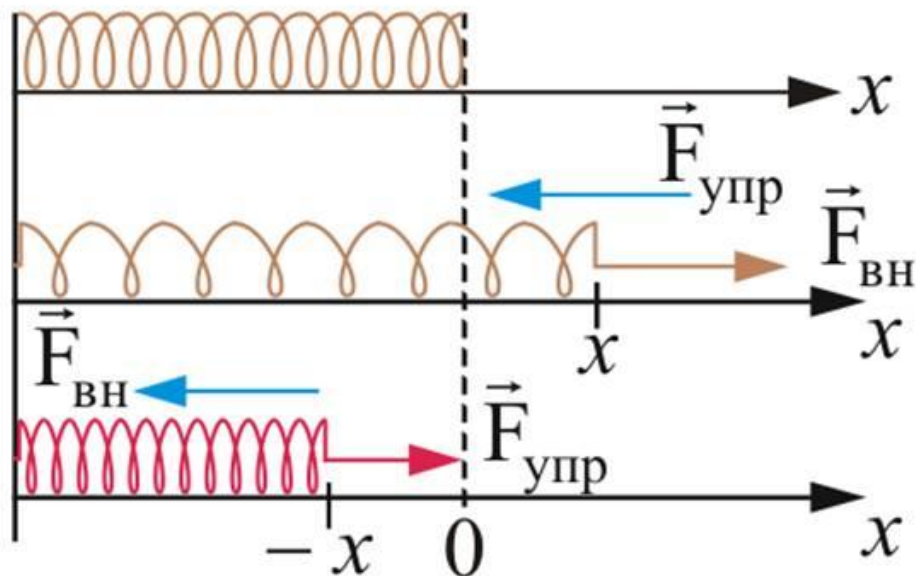
В рамках классической механики имеют дело с гравитационными и электромагнитными силами, а также с упругими силами и силами трения.

## Сила упругости

сила, возникающая в теле в результате его деформации и стремящаяся вернуть тело в исходное состояние.

$$F = k\Delta l$$

*Сила упругости по своей природе - электромагнитная*

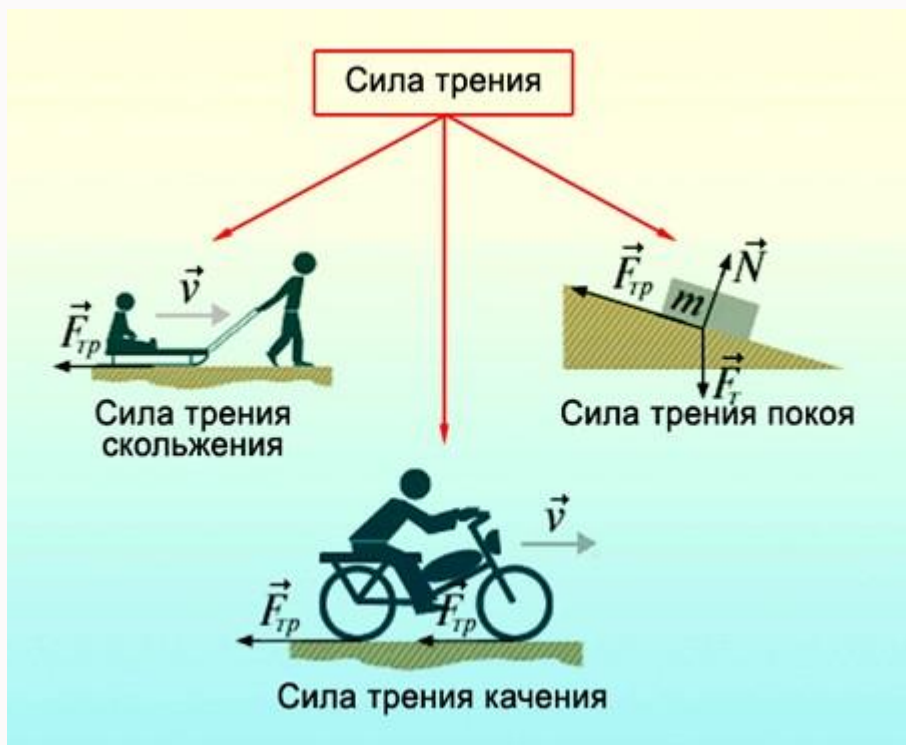


В рамках классической механики имеют дело с гравитационными и электромагнитными силами, а также с упругими силами и силами трения.

## Сила трения

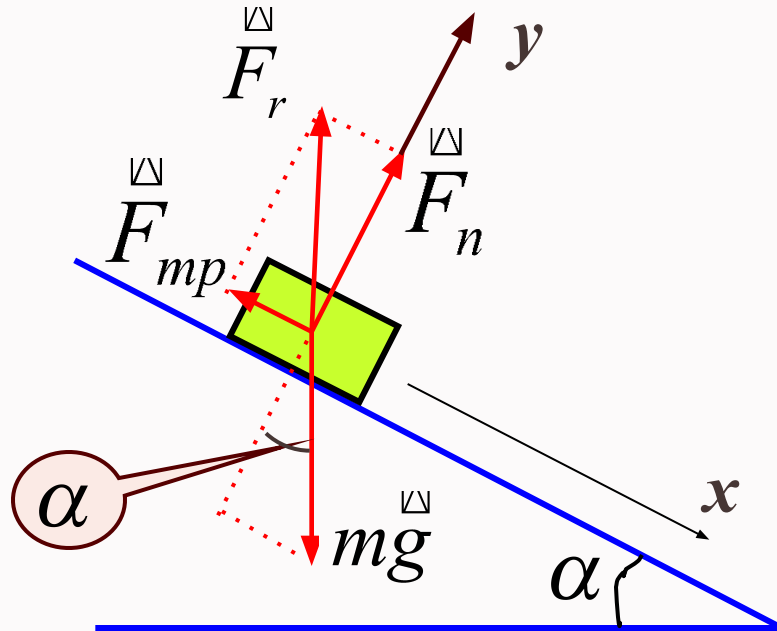
появляются при перемещении соприкасающихся тел или их частей относительно друг друга. *Внешнее* – при соприкосновении разных тел, *внутреннее* – трение между частями одного тела (жидкость, газ, плазма)

*Сила трения по своей природе - электромагнитная*



## ДИНАМИКА.

## Практическое применение законов Ньютона



$\vec{F}_n$  - сила нормального давления

$\vec{F}_{тр}$  - сила трения

$\vec{F}_r$  - сила реакции

Запишем второе уравнение Ньютона:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{F}_n + \vec{F}_{тр} \quad - \text{векторное уравнение движения}$$

## Практическое применение законов Ньютона

Запишем уравнения движения в проекциях на оси координат:

$$\begin{cases} ma_x = mg_x + F_{nx} + F_{mpx} \\ ma_y = mg_y + F_{ny} + F_{mpy} \end{cases}$$

$$a_x = a, \quad mg_x = mg \sin \alpha, \quad F_{nx} = 0, \quad F_{mpx} = -kF_n$$

$$a_y = 0, \quad mg_y = -mg \cos \alpha, \quad F_{ny} = F_n, \quad F_{mpy} = 0$$

Итог:

$$a = g(\sin \alpha - k \cos \alpha)$$



# ДИНАМИКА. Законы Ньютона, применимость



*ВОПРОС: Вы разрабатываете систему экстренного спасения космонавтов с МКС. Какие факторы необходимо учитывать? Можно ли выпрыгнуть из МКС (конечно же в скафандре) с парашютом, открыть его на нужной высоте и безопасно приземлиться?*