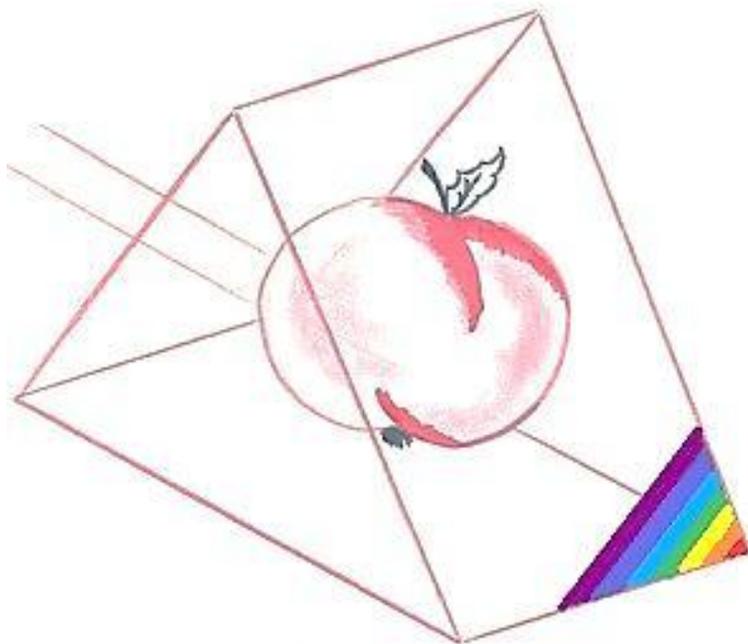
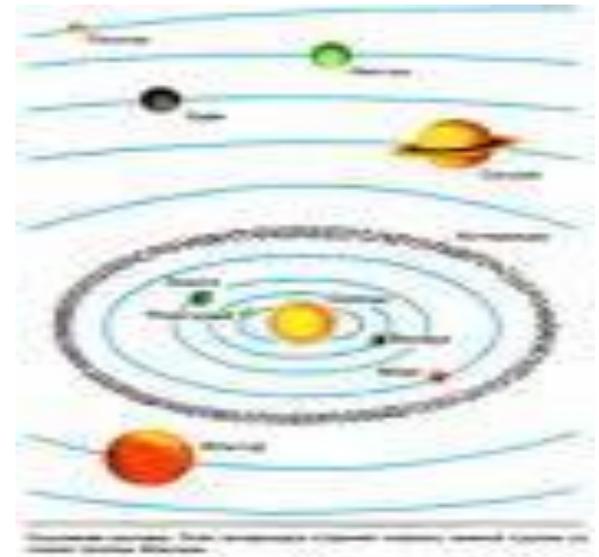


# Закон всемирного тяготения

§15, упр 15

Гипотез я не измышляю.  
И. НЬЮТОН





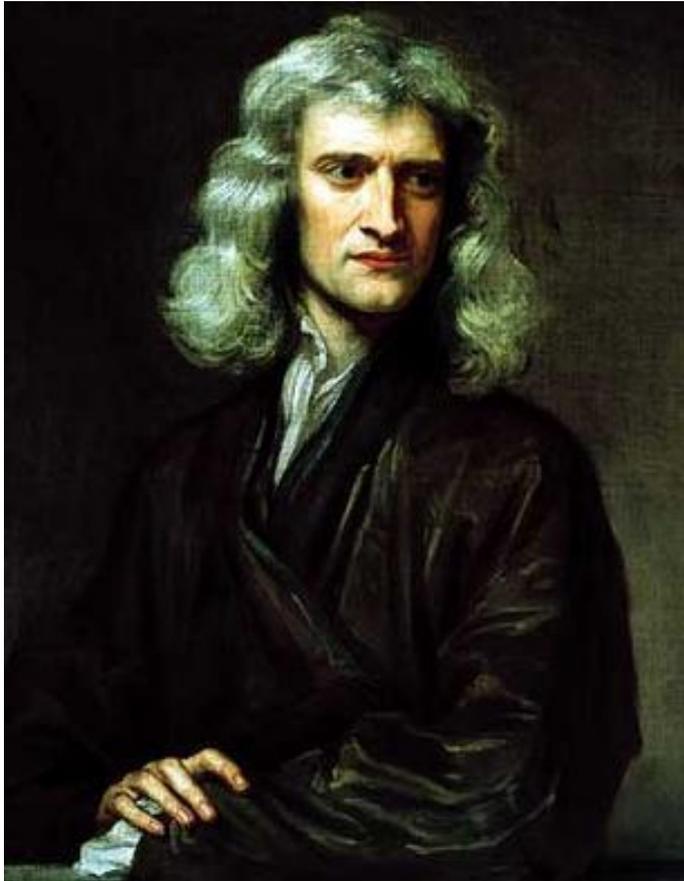
Датский астроном Тихо Браге многие годы наблюдал за движением планет , накопил многочисленные данные. Но не сумел их обработать.



Это сделал его ученик Иоганн Кеплер.

Используя идею Коперника о гелиоцентрической системе и результаты наблюдений Тихо Браге, Кеплер установил законы движения планет вокруг Солнца. Но Кеплер не сумел объяснить динамику движения. Почему планеты обращаются вокруг Солнца именно по таким законам?

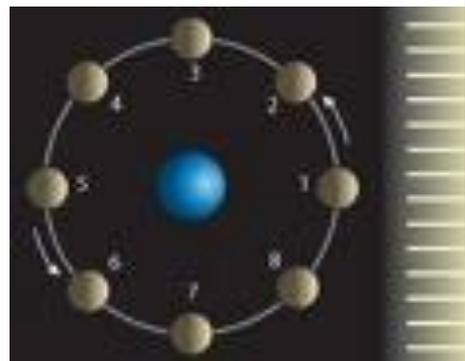
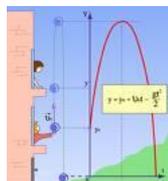
# Закон всемирного тяготения 1667



Исаак Ньютон (1643—1727)

Исаак Ньютон открыл этот закон в возрасте 23 лет, но целых 9 лет не публиковал его, так как имевшиеся тогда неверные данные о расстоянии между Землей и Луной не подтверждали его идею. Лишь в 1667 году, после уточнения этого расстояния, закон всемирного тяготения был наконец-то отдан в печать.

Ньютон предположил, что ряд явлений, казалось бы ни имеющих ничего общего, вызваны одной причиной

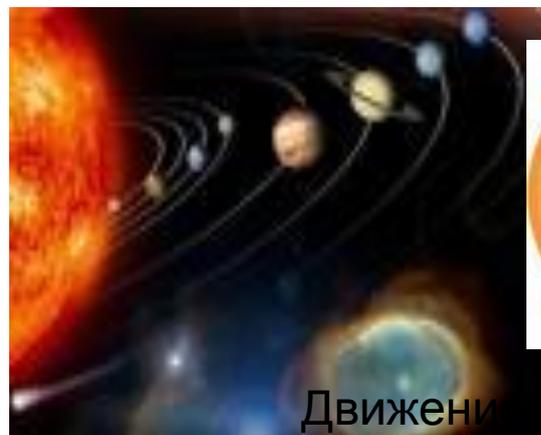


Движение Луны вокруг Земли

Падение тел на Землю



Приливы и отливы



Движение планет вокруг Солнца



# История открытия закона



Яблоня Ньютона

На склоне своих дней Исаак Ньютон рассказал, как это произошло: он гулял по яблоневому саду в поместье своих родителей и вдруг увидел Луну в дневном небе. И тут же на его глазах с ветки оторвалось и упало на землю яблоко. Тут ему и пришло в голову, что, возможно, это одна и та же сила заставляет и яблоко падать на землю, и Луну оставаться на околоземной орбите.

## Вывод закона всемирного тяготения

### 1. Зависимость силы тяготения от массы тела

$$F_1 = m_1 g$$

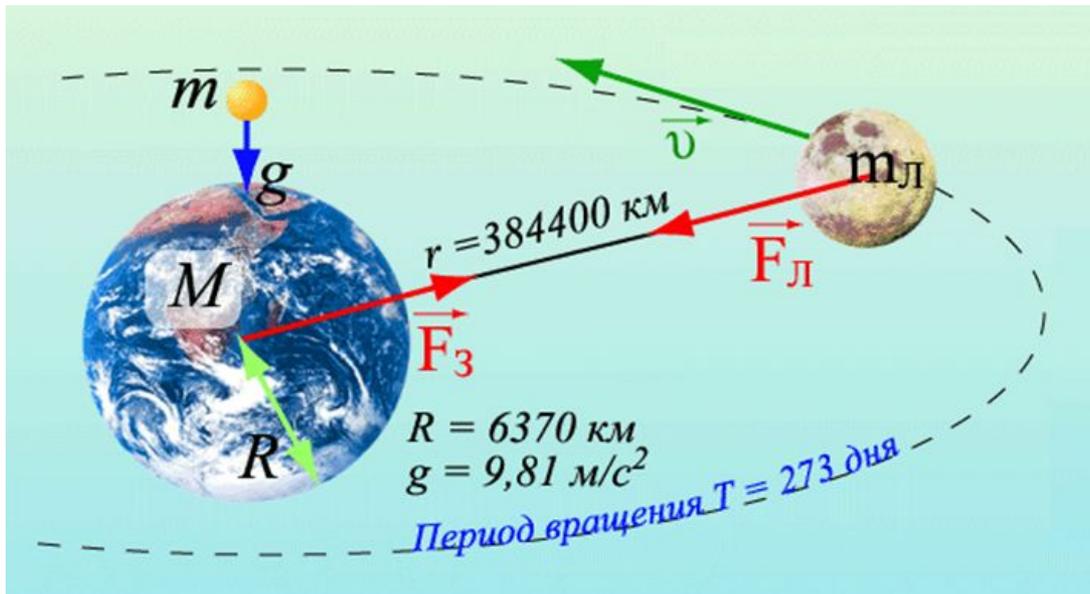
$$g - \text{const}$$

$$F_1 = F_2$$

$$F \sim m_1 \cdot m_2$$

# Вывод закона всемирного тяготения

## 2. Зависимость силы тяготения от расстояния



Центростремительное ускорение Луны равно:

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

$$R = 60 R_3$$

$$\frac{g}{a} = \frac{9,8}{0,0027} = 60^2 \implies F \sim \frac{1}{R^2}$$

## Вывод закона всемирного тяготения

$$F \sim m_1$$

$$F \sim m_2$$

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

$$F \sim \frac{m_1 \cdot m_2}{R^2}$$

# Закон всемирного тяготения

*Сила взаимного притяжения двух тел прямо пропорциональна произведению масс этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними*

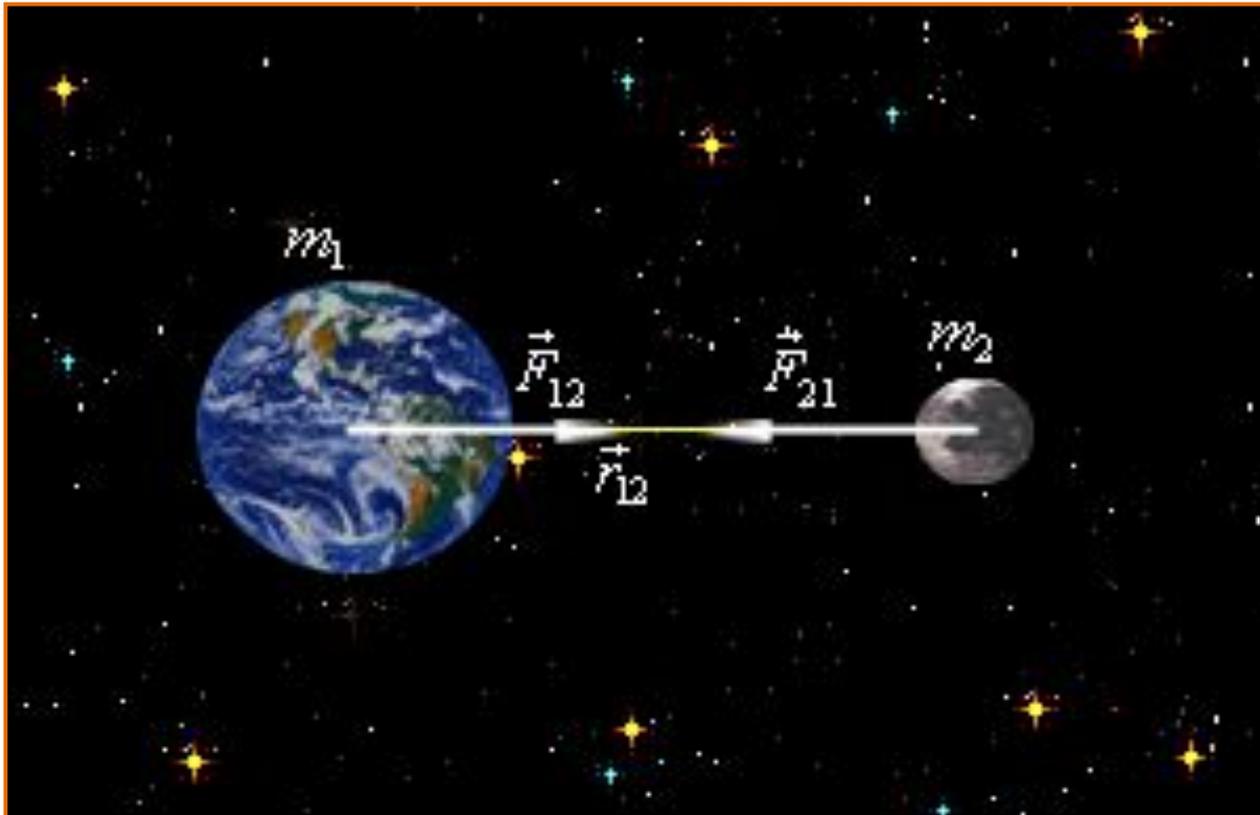
$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{R^2}$$

*$m_1$ ,  $m_2$  - массы взаимодействующих тел,*

*$R$  – расстояние между ними,*

*$G$  – гравитационная постоянная*

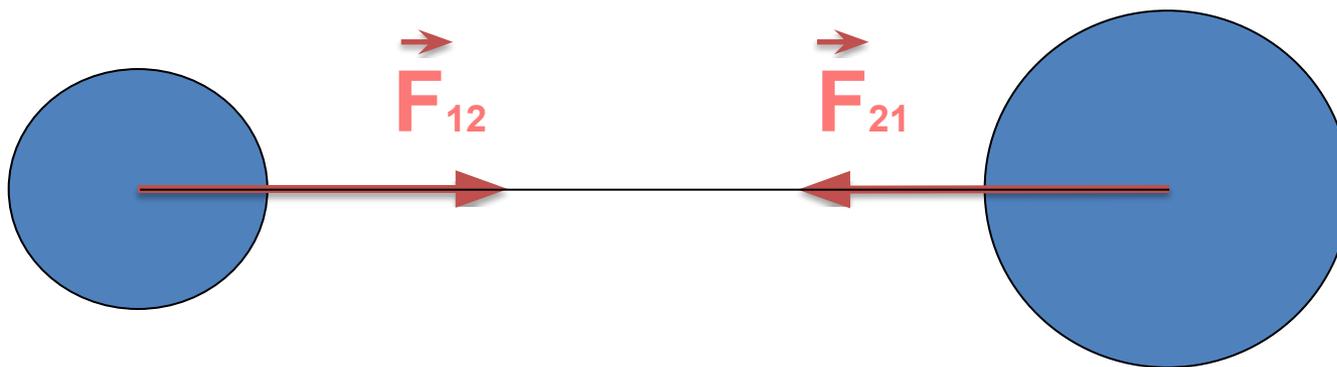
# Сила тяготения между Землей и Луной



$$\mathbf{F}_{12} = \mathbf{F}_{21}$$

# Особенности сил тяготения

Силы тяготения направлены вдоль прямой, проходящей через центры взаимодействующих тел.



$$F_{12} = F_{21}$$

# Гравитационная

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{Н \cdot м^2}{кг^2}$$

## Физический смысл гравитационной постоянной.

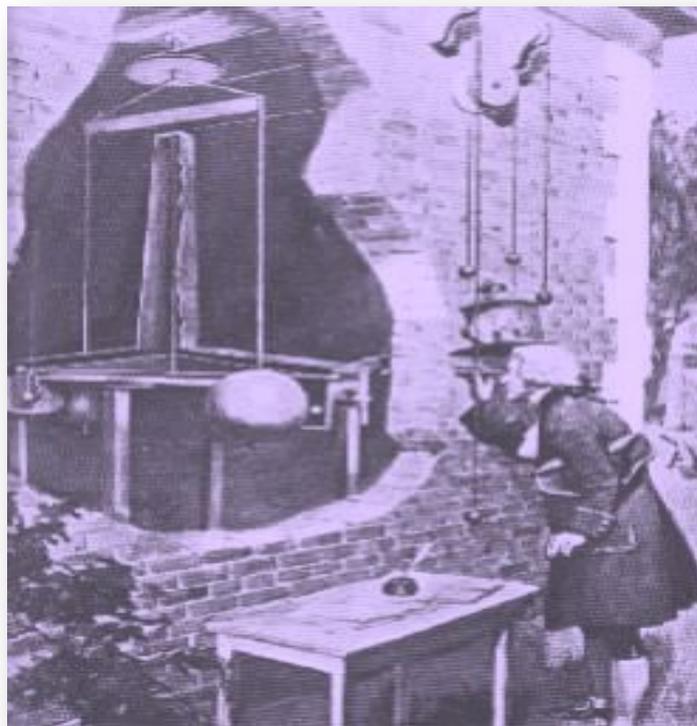
Гравитационная постоянная численно равна силе гравитационного притяжения двух тел, массой по 1 кг каждое, находящихся на расстоянии 1 м одного от другого.

Первое экспериментальное измерение гравитационной постоянной было осуществлено Генри Кавендишем в 1798 году.

## Опыт Кавендиша



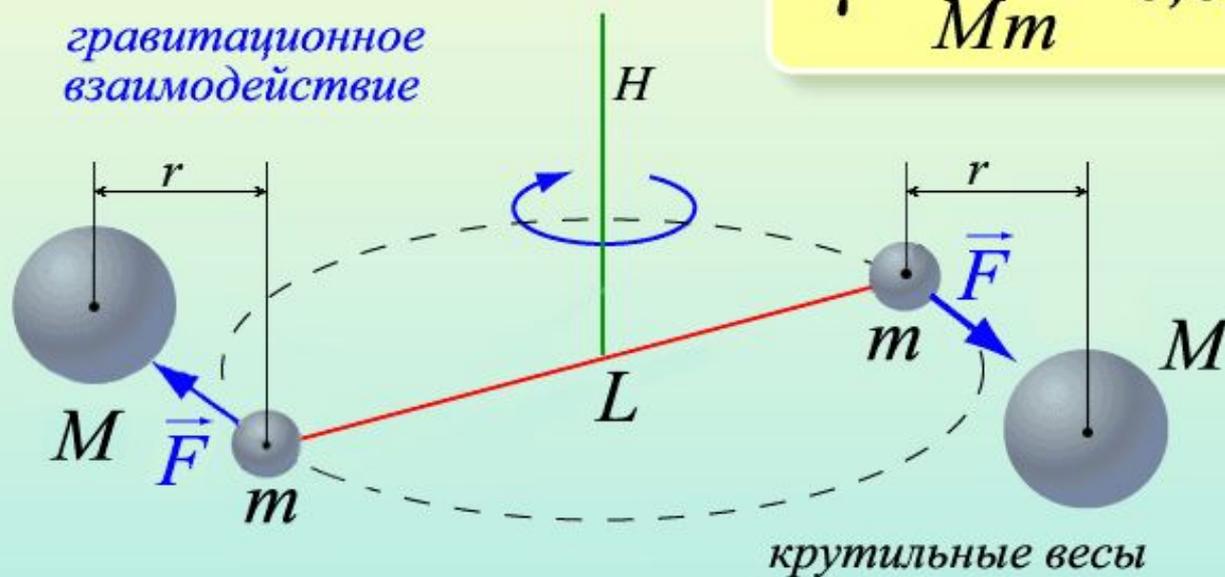
Генри  
Кавендиш



Экспериментальная установка – крутильные весы

## Опыт Кавендиша

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



*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

**G** – гравитационная постоянная, она численно равна силе гравитационного притяжения двух тел массой по 1 кг, находящихся на расстоянии 1 м одно от другого.

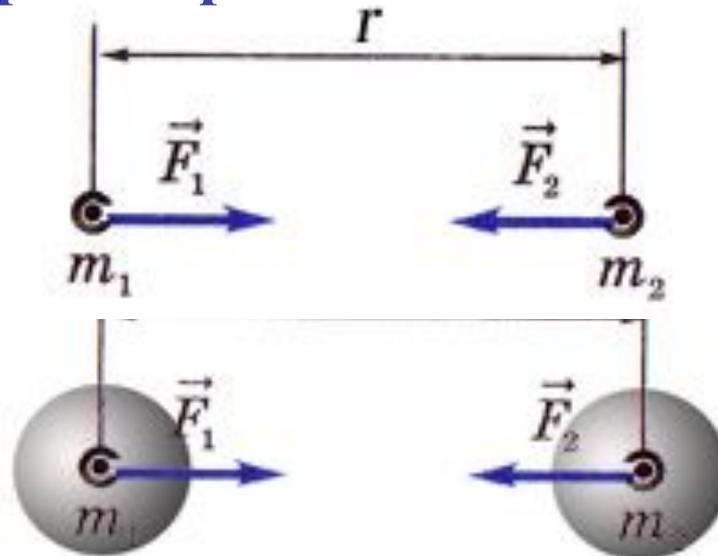
$$G=6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$$

**Сила взаимного притяжения тел всегда направлена вдоль прямой, соединяющей эти тела.**

# Границы применимости закона

Закон всемирного тяготения имеет определенные границы применимости; он применим для:

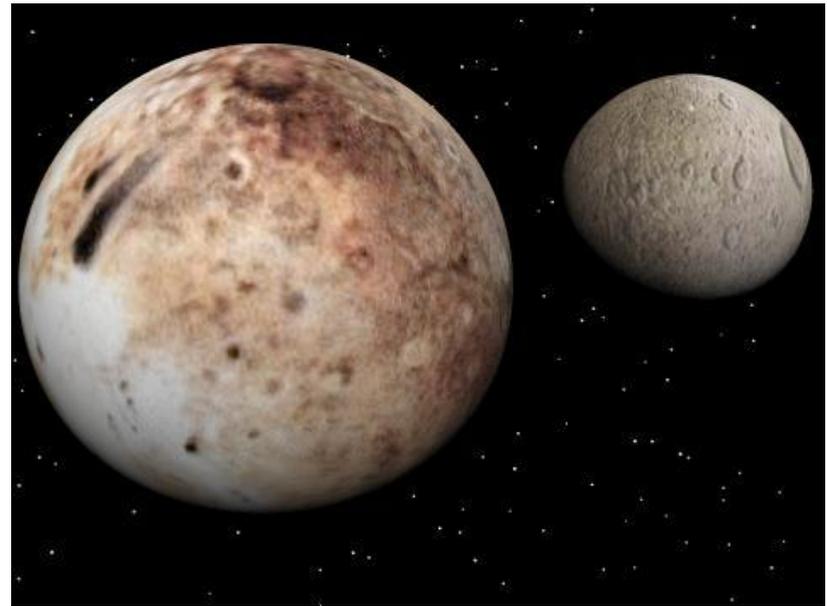
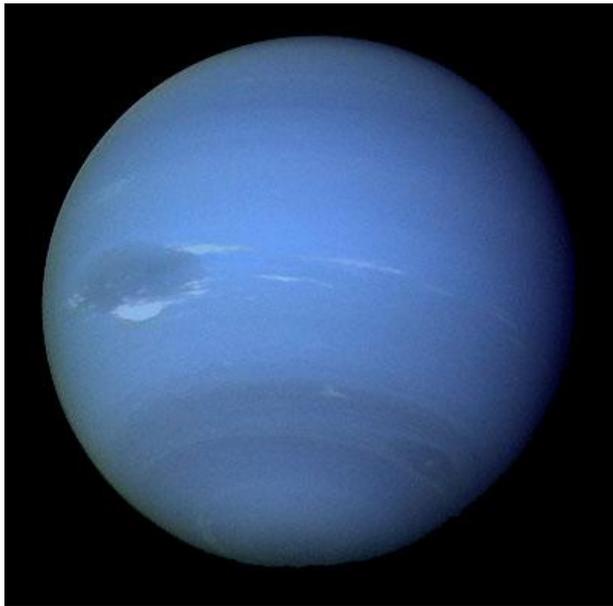
- 1) материальных точек;
- 2) тел, имеющих форму шара;
- 3) шара большого радиуса, взаимодействующего с телами, размеры которых много меньше размеров шара.



Открытие Ньютоном закона всемирного тяготения явилось важнейшим событием в истории физики.

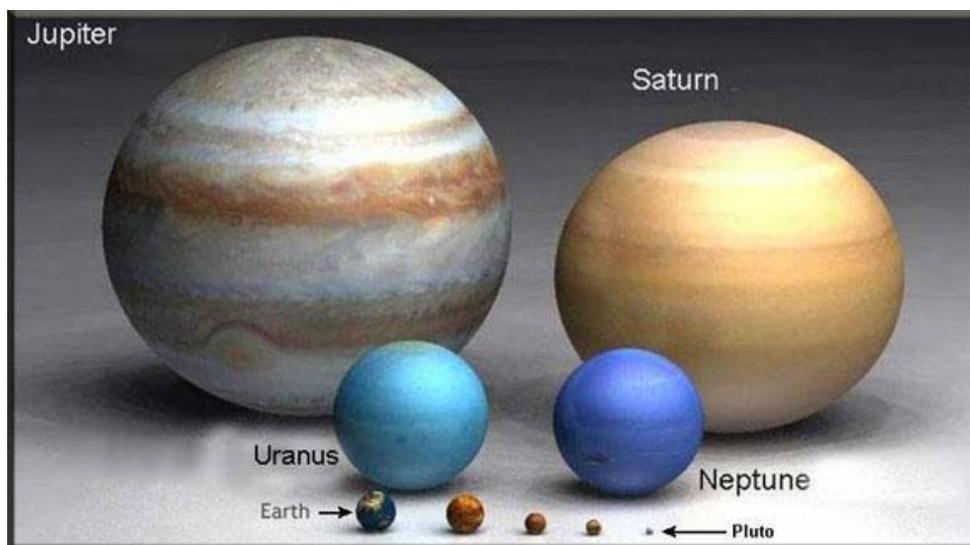
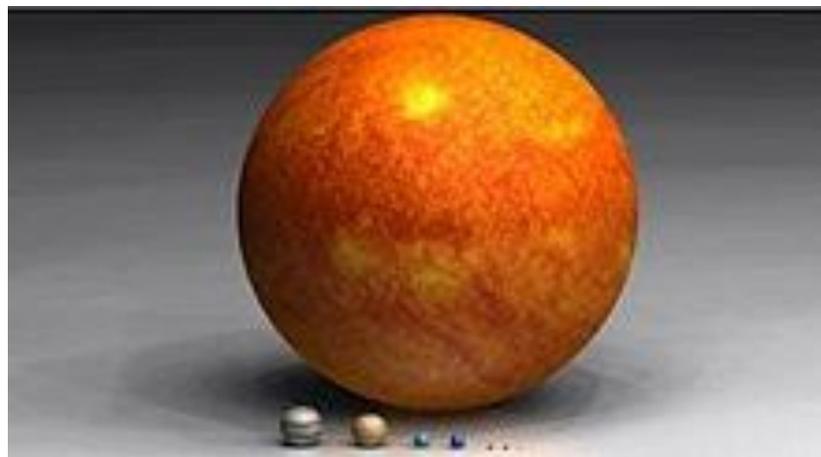
На основе закона всемирного тяготения:

- открыты планеты Нептун и Плутон



## На основе закона всемирного тяготения:

- определены массы Солнца, планет и других небесных тел



## На основе закона всемирного тяготения:

- раскрыты загадки движения комет, тайны приливов



## На основе закона всемирного тяготения:

- вычисляются параметры движения космических аппаратов, искусственных спутников Земли

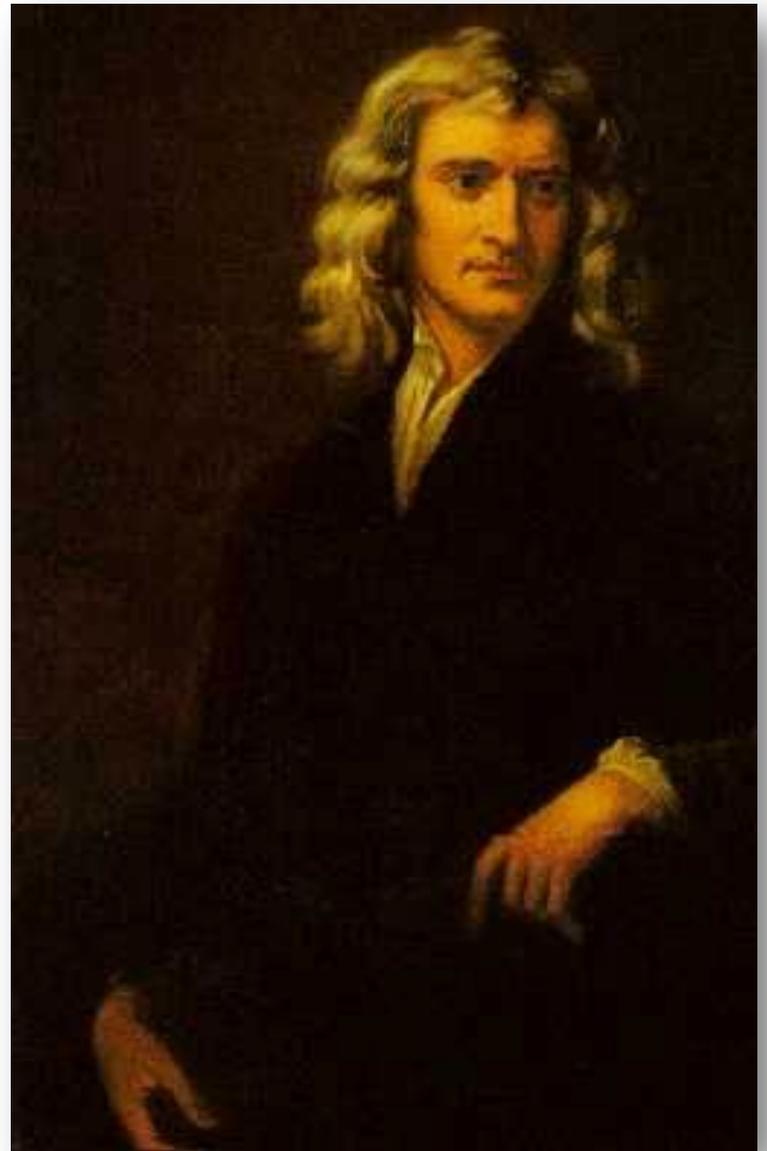


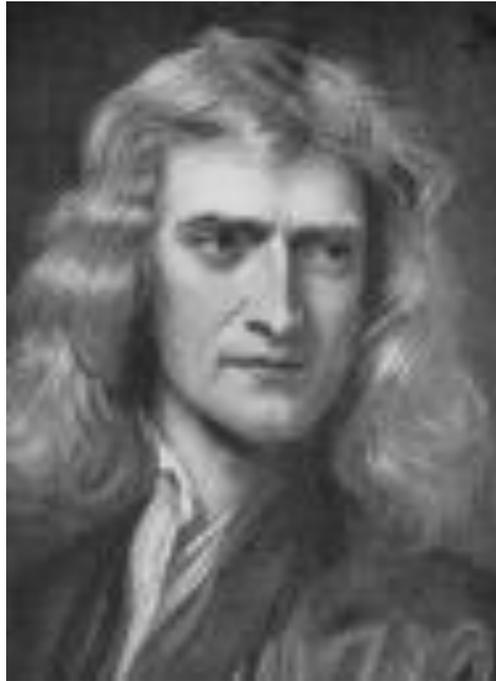
Ньютон показал, что с единой точки зрения можно охватить весь механизм мировых явлений - от вращения неподвижных звезд до перемещения химических атомов.

Д.И.

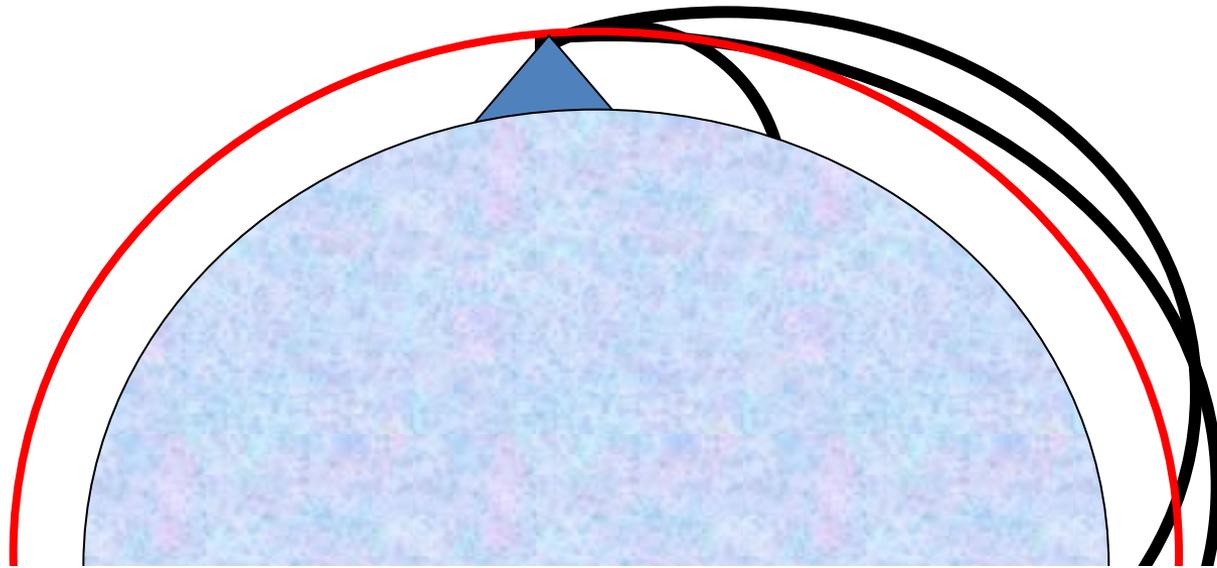
Менделеев

Он самый счастливый – систему мира можно установить только один раз.





На вопрос о том, какова природа сил тяготения, Ньютон отвечал: «Не знаю, а гипотез измышлять не желаю».



- Любое тело, брошенное с некоторой высоты над землей, движется к земле с ускорением  $g$ .
- Чтобы тело начало вращаться вокруг земли,  $g$  должно быть равно:

$$a_{ц.с.} = \frac{v^2}{R_3}$$

$$a_{ц} = \frac{v^2}{r}$$

$v$  - модуль скорости  
 $r$  - радиус окружности

$$r = R + h$$

$$a_{ц} = g$$

$$g = \frac{v^2}{r}$$

$\Rightarrow$

$$v^2 = gr$$

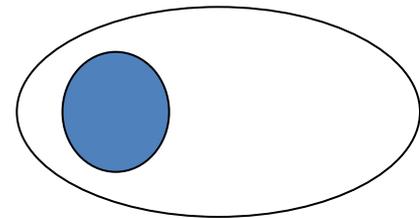
$$v = \sqrt{gr}$$

- Первая космическая  
скорость (круговая)

$$g = \frac{v_o^2}{R_3} \rightarrow v_o = \sqrt{gR_3}$$

Скорость рассчитанная по этой формуле называется **первой космической скоростью**. Она равна **7,9 км/с**.

$$v_o = \sqrt{g_1 (R_3 + h)}$$



Если тело находится на большой высоте над Землей.

# Расчет первой космической скорости

Если  $h < R_3$ , то  $r = R_3$

$g_0$  – ускорение свободного падения вблизи поверхности Земли.

Подставим в формулу  $V_1$ :

где  $R_3 = 6,4 * 10^6$  м

$g_0 = 9,8$  м/с<sup>2</sup>

**$V = 7,9$  км/с** – Первая космическая скорость

# Космические скорости

## Первая и вторая космические скорости

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

7,9 км/с.

$$v_2 = v_1\sqrt{2}$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

11,2 км/с

Чем больше масса и чем меньше радиус небесного тела, тем больше его космические скорости

## 2,3,4 космические скорости

- 11,2 км/с – скорость при которой тело преодолевает поле тяжести Земли и становится искусственной планетой.
- 16,6 км/с - минимально необходимая скорость тела без двигателя, позволяющая преодолеть притяжение Солнца и в результате уйти за пределы Солнечной системы в межзвёздное пространство.
- 31,8 км/с – скорость, позволяющая телу покинуть Млечный Путь – нашу галактику.

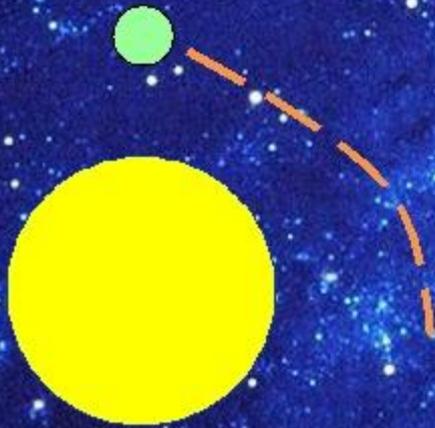
# Основные выводы

- **Третья космическая скорость** — это минимальная скорость, которую нужно сообщить телу, чтобы оно смогло покинуть Солнечную систему.

$$v_3 = \sqrt{(\sqrt{2} - 1)^2 v^2 + v_2^2}$$

- **Четвертая космическая скорость** — это минимальная скорость, которую нужно сообщить телу, чтобы оно смогло покинуть галактику Млечный Путь.

$$v_4 = \sqrt{\varphi}$$



## Самая высокая скорость

Третья космическая скорость равна 16,7 км/с, которая необходима для преодоления телом притяжения Солнца и выхода за пределы Солнечной системы

Первым космическим аппаратом, достигшим 3-й космической скорости, позволяющей выйти за пределы Солнечной системы, стал «Пионер-10». Ракета-носитель «Атлас-СЛВ 3С» с модифицированной 2-й ступенью «Центавр-Д» и 3-й ступенью «Тиокол-Те-364-4» 2 марта 1972 г. покинула Землю с небывалой для того времени скоростью 51682 км/ч.

# Четвертая космическая скорость

**Четвертая космическая скорость** — это минимальная скорость, которую нужно сообщить телу, чтобы оно смогло покинуть галактику Млечный Путь.

$$v_4 = \sqrt{\varphi}$$

Где  $\varphi$  — гравитационный потенциал.  
Гравитационный потенциал может меняться в зависимости от положения в галактике и момента времени.

Вблизи Солнца:  $v_4 = 550$  км/с



$V > 11,2$  км/сек.  
(гипербола)

$V = 11,2$  км/сек.  
(парабола)

$7,9 < V < 11,2$  км/сек.  
(эллипс)

$V = 7,9$  км/сек.  
(круговая  
орбита)

$V < 7,9$  км/сек.  
(траектория тела,  
падающего на Землю)



- 1. Масса Юпитера  $1,9 \cdot 10^{27}$  кг, его  $R=7,13 \cdot 10^7$  м. Чему равно ускорение свободного падения для планеты Юпитер?
- 2. Определите скорость движения спутника вокруг Земли по круговой орбите на высоте, равной радиусу Земли, если первая космическая скорость у поверхности Земли равна 8 км/с.

- 3. Масса и радиус планеты соответственно в 2 раза больше, чем у Земли. Чему равна первая космическая скорость для этой планеты?
- 4. Масса Луны примерно в 100 раз меньше массы Земли, а ее диаметр в 4 раза меньше диаметра Земли. Сравните силы тяжести, действующие на тела одинаковой массы на Земле и на Луне.