

## Первый закон Кеплера

Каждая планета движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.

$$e = \frac{OF_1}{a} = \frac{OF_2}{a}$$

$$q = a - a \cdot e = a(1 - e),$$
$$Q = a(1 + e).$$

## Второй закон Кеплера

Радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает равные площади.

## Третий закон Кеплера

Квадраты сидерических периодов обращений двух планет относятся как кубы больших полуосей их орбит.

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

$$T = \sqrt{a^3}$$

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3} \Rightarrow a_1 = \sqrt[3]{\frac{T_1^2 \cdot a_2^3}{T_2^2}}$$

*Задача 1.* Замечено, что противостояния некоторой планеты повторяются через  $S=2$  года.  
Чему равна большая полуось ее орбиты?



1



2



3



4



2. За какое время Марс совершает полный оборот вокруг Солнца, если он в полтора раза (1,5) дальше, чем Земля.

**Задача.** Противостояния некоторой планеты повторяются через 2 года. Чему равна большая полуось ее орбиты?

Дано:

$$S = 2 \text{ года}$$

$$T_{\oplus} = 1 \text{ год}$$

$$a_{\oplus} = 1 \text{ а. е.}$$

---

$a = ?$

Решение.

Большую полуось орбиты можно определить из третьего закона Кеплера:  $\frac{T^2}{a^3} = \frac{T_{\oplus}^2}{a_{\oplus}^3}$ ,  $a^3 = \frac{a_{\oplus}^3 T^2}{T_{\oplus}^2}$ , а звездный период — из соотношения между сидерическим и синодическим периодами:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_{\oplus}} - \frac{1}{T}, \quad T = \frac{T_{\oplus} S}{S - T_{\oplus}}, \quad T = \frac{1 \text{ год} \cdot 2 \text{ года}}{2 \text{ года} - 1 \text{ год}} = 2 \text{ года.}$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{(1 \text{ а. е.})^3 (2 \text{ года})^2}{(1 \text{ год})^2}} \approx 1,59 \text{ а. е.}$$

Ответ:  $a \approx 1,59 \text{ а. е.}$

# Задача № 5 стр. 58 учебника

$$a_{\text{земля}} = 1 \text{ а.е.}$$

$$a_{\text{марса}} = 1,5 \text{ а.е.}$$

$$T_0 = 1 \text{ г}$$

$$T_M = ? \text{ г}$$

$$\frac{T_M^2}{T_3^2} = \frac{a_M^3}{a_3^3}; \text{ по третьему закону Кеплера}$$

$$T_M = \sqrt{T_3^2 \frac{a_M^3}{a_3^3}};$$

$$T_M = \sqrt{1^2 \frac{1,5^3}{1}} = 1,9 \text{ год}$$

# Закон всемирного тяготения Ньютона

Разработала  
учитель астрономии УО ОГОСШ № 4  
Трофимова Елена  
Викторовна  
Астрономия 11 класс

# ОТКРЫТИЮ ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ ?



Пизанская  
башня

**Многочисленные  
опыты  
Галилео Галилея  
позволили сделать  
выводы о свободном  
падении тел и дали  
толчок к открытию  
закона всемирного  
тяготения.**

**Но оставался главный вопрос.**

**Что же удерживает планеты,  
в частности Землю,  
в их движении вокруг Солнца?  
Что заставляет обращаться планеты  
вокруг Солнца, а спутники вокруг  
планет?**

**Чем объясняется устойчивость  
планетной системы?**



# ПЛАН

- 1. Закон всемирного тяготения Ньютона.  
Небесная механика.**
- 2. Уточнение законов Кеплера Ньютоном.**
- 3. Возмущения в движении небесных тел.  
Приливы и отливы.**
- 4. Определение масс небесных тел.**
- 5. Решение задач на применение законов Кеплера и Ньютона.**

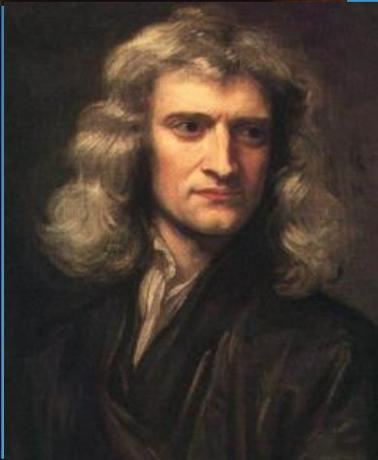
# Как был открыт закон всемирного тяготения.



Из истории физики.  
Датский астроном Тихо Браге (1546-1601), наблюдавший за движением планет, накопил огромное количество интересных данных, но не сумел их обработать.

Иоганн Кеплер (1571-1630) используя идею Коперника о гелиоцентрической системе и результаты наблюдений Тихо Браге, установил законы движения планет вокруг Солнца, но не смог объяснить динамику этого движения.

Исаак Ньютон открыл этот закон в возрасте 23 лет, но лет не публиковал его, т.к. 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 отдан в



# Исаак Ньютон

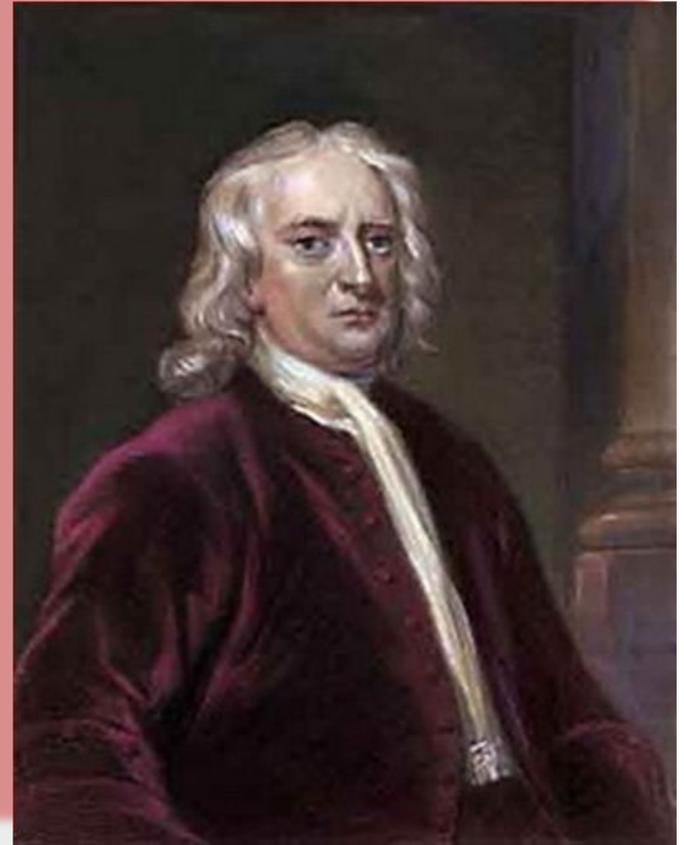
английский физик, математик и астроном, создатель классической механики, президент (с 1703) Лондонского королевского общества.

**В механике Ньютон продолжил труды Галилея и Кеплера.**

**Он сформулировал основные законы классической механики.**

**Открыл**

- закон всемирного тяготения,
- теорию движения небесных тел, создав основы небесной механики,
- изобрёл зеркальный телескоп.



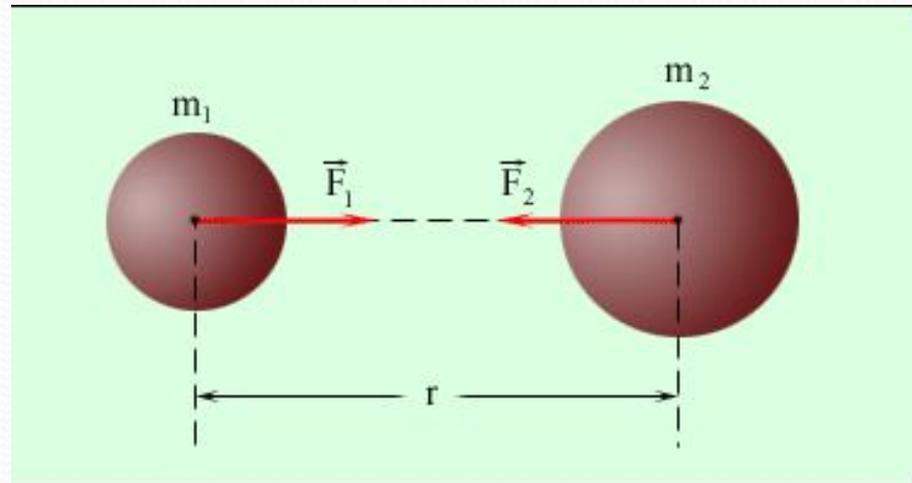
- разработал дифференциальное и интегральное исчисления

# ТЯГОТЕНИЯ

## Три закона движения тел

- Закон инерции
- Закон динамики материальной точки
- Закон действия и противодействия

Закон всемирного тяготения был открыт И. Ньютоном в 1682 году. Ещё в 1665 году 23-летний Ньютон высказал предположение, что силы, удерживающие Луну на её орбите, той же природы, что и силы, заставляющие яблоко падать на Землю. По его гипотезе между всеми телами Вселенной действуют силы притяжения (гравитационные силы), направленные по линии, соединяющей центры масс.



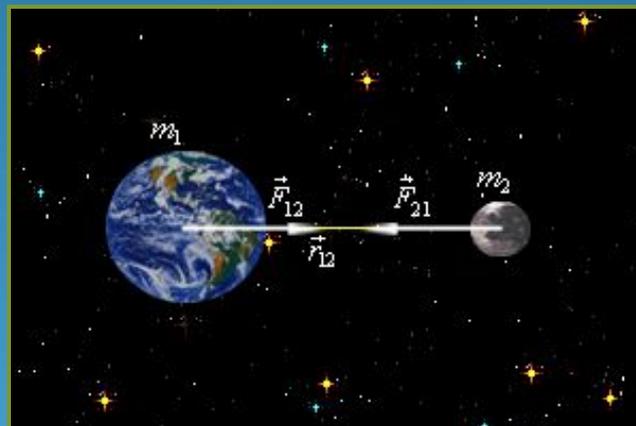
**Центр масс**, центр инерции, геометрическая точка, положение которой характеризует распределение масс в теле или механической системе.

В 1687 г. Ньютон установил один из фундаментальных законов механики, получивший название закона всемирного тяготения:

Два любых тела притягиваются друг к другу с силой, модуль которой прямо пропорционален произведению их масс и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними,

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

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



где  $m_1$  и  $m_2$  – массы взаимодействующих тел,  $r$  – расстояние между телами,  $G$  – коэффициент пропорциональности, одинаковый для всех тел в природе и называемый постоянной всемирного тяготения или гравитационной постоянной  $= 6,673 \cdot 10^{-11} \text{Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$

# Открытие всемирного закона тяготения

Закон всемирного тяготения справедлив для сферически симметричных тел (при расстояниях между центрами больше суммы их радиусов), а приближенно он выполняется для любых тел, если расстояние между ними велико по сравнению с их размерами.

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

Два тела притягиваются друг к другу с силой, пропорциональной произведению масс этих тел и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

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

**Запомни, что ...**

**Гравитационное взаимодействие** – это взаимодействие, свойственное всем телам Вселенной и проявляющееся в их взаимном притяжении друг к другу, а само явление всемирного тяготения – **гравитацией**

**Гравитационное поле** – особый вид материи, осуществляющее гравитационное взаимодействие,



# Границы применимости

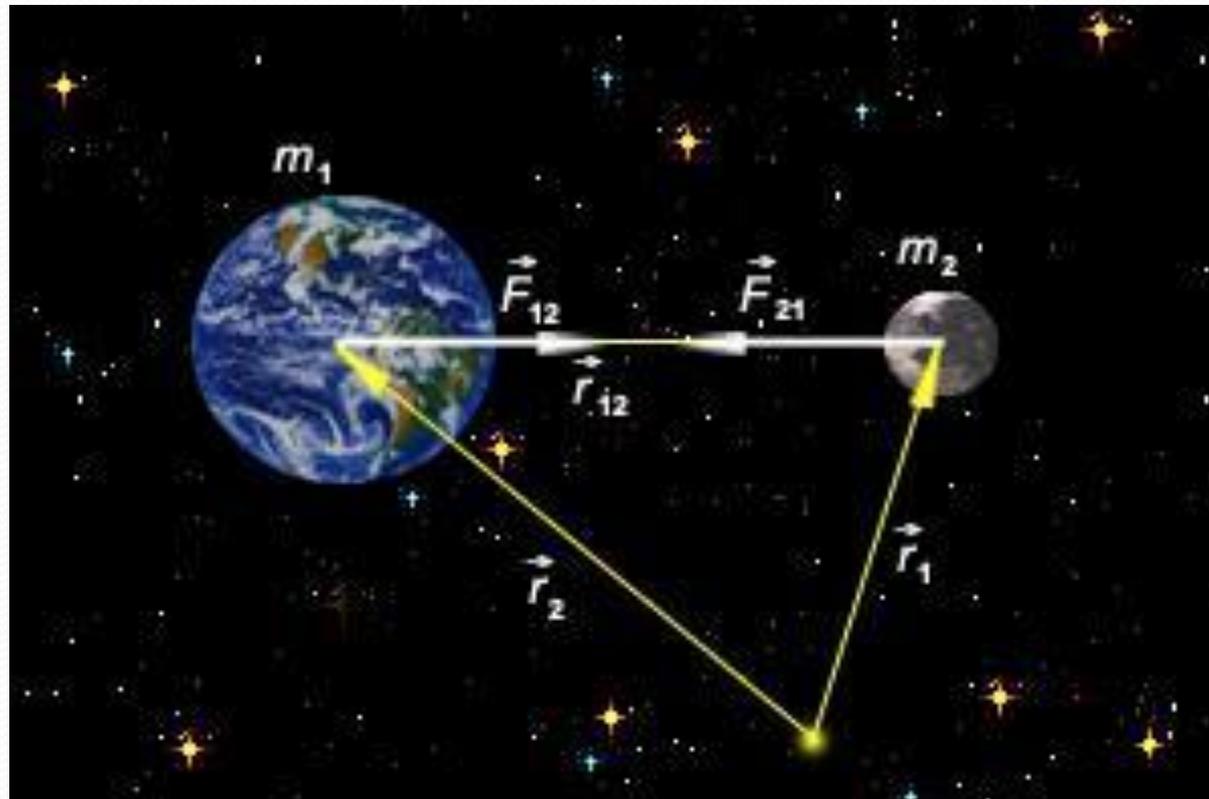
- Тела являются материальными точками
- Тела имеют форму шара
- Одно из тел – шар большого радиуса, другое – материальная точка.



# Закон всемирного тяготения

Исаак Ньютон смог объяснить движение тел в космическом пространстве с помощью **закона всемирного тяготения**.

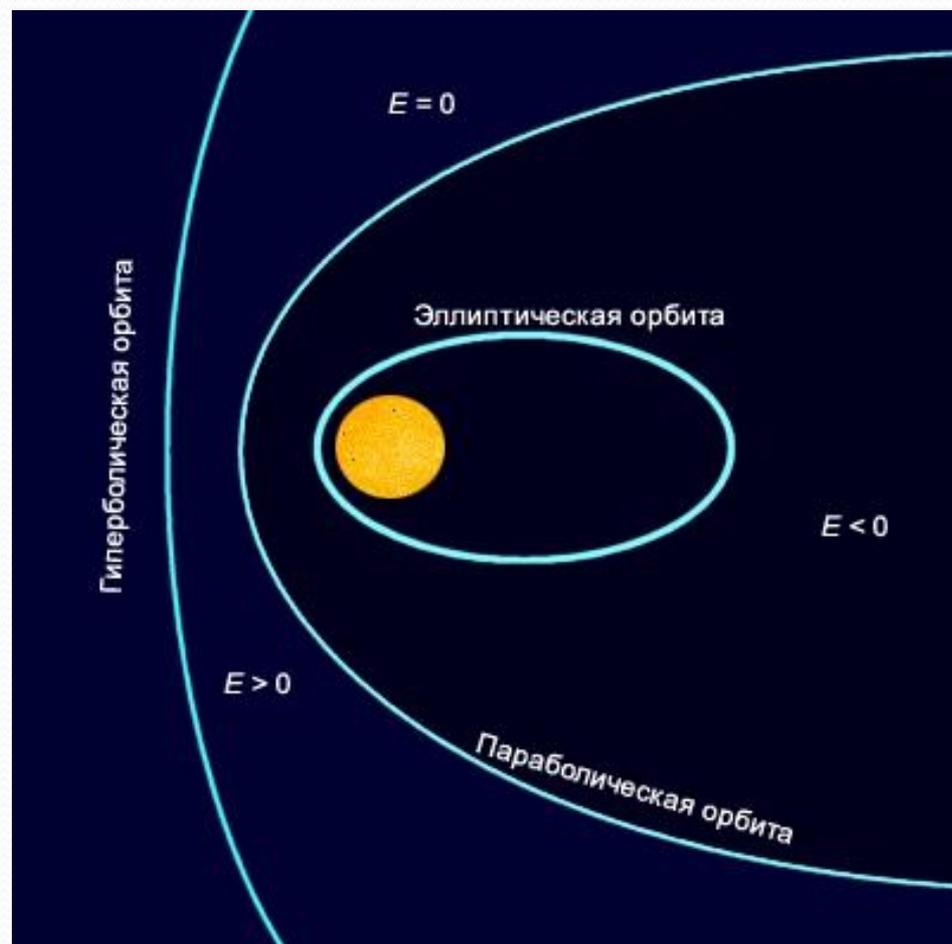
Два телаложение, что между всеми телами действуют силы взаимного притяжения, которые он назвал силами всемирного тяготения.



# Обобщения законов Кеплера

Кеплер открыл свои законы эмпирическим путем. Ньютон вывел законы Кеплера из закона всемирного тяготения. Для определения масс небесных тел важное значение имеет обобщение Ньютоном третьего закона Кеплера на любые системы обращающихся тел.

1. Под действием тяготения одно небесное тело движется в поле тяготения другого небесного тела по одному из конических сечений — эллипсу, окружности, параболе или гиперболе. При движении по эллипсу притягивающее тело всегда находится в одном из фокусов.



# Обобщения законов Кеплера

Закон не нуждается в обобщении.

Квадраты сидерических периодов планет, умноженные на сумму масс Солнца и планеты относятся как кубы больших полуосей их орбит.

$$\frac{T_1^2 (M_C + m_1)}{T_2^2 (M_C + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

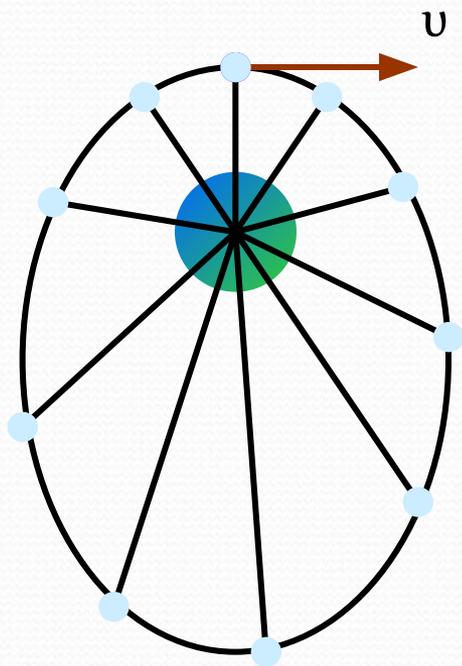
В системе планета – спутник – 2-я планета – 2-ой спутник закон запишется в следующем виде:

$$\frac{T_1^2 (M_1 + m_1)}{T_2^2 (M_2 + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

С учётом того, что массы планет больше масс спутников, можно определить отношение масс планет:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{T_2^2}{T_1^2} \cdot \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

# Движение спутников



# Физкультминутка «Масштабы Вселенной»

# Возмущения планет

После открытия Урана в 1781 г. Уильямом Гершелем астрономы пытались объяснить необычное движение этой планеты по орбите. Они не исключали возможность влияния какой-то массивной неоткрытой дальней планеты. Первые исследования в этом плане провел в 1821 г. Алекс Бувард. В этом же году и Фридрих Бессель в письме Генриху Альбесу высказал предположение о возможности существования планеты за пределами Урана.

Для того чтобы рассчитать погрешности движения Урана по орбите — ибо теоретически эта планета должна была двигаться по-другому, — ученым было необходимо учесть гравитацию Юпитера и Сатурна. Сделать это было очень сложно с математической точки зрения, некоторые ученые даже сочли эту задачу неразрешимой.

К счастью, эту чрезвычайно трудную задачу независимо друг от друга успешно решили два математика — Джон Адамс и Урбен Леверье. Адамс предположил, что гипотетическая планета находится от Солнца на расстоянии 38,4 а.е.



У. Гершель



Ф.Бессель



У.  
Леверье



Д. Адамс

# Возмущения планет

Эта цифра мало отличалась от полученной благодаря расчетам по правилу Тициуса—Боде. Решение Адамса было представлено Эри из Гринвичской обсерватории, но его проигнорировали.

Урбен Леверье приступил к проблеме возможного существования Нептуна в июне 1845 г. Отсутствие интереса к этой проблеме среди французских астрономов навело его на мысль отправить свои расчеты Эри, в Великобританию. С 1846 г. разворачивается программа наблюдений в Кембриджской обсерватории, которые, впрочем, не принесли никаких результатов. В августе этого же года Леверье представил другой труд, более подробный, о возможном расположении планеты. 23 сентября 1846 г. Галле вместе с Генрихом д'Аррестом направил телескоп в соответствии с рекомендациями французского коллеги. Час спустя планета была обнаружена на близком расстоянии от рассчитанного Леверье участка неба.



Джордж Бидделл Эри



Иоганн Готфрид  
Галле

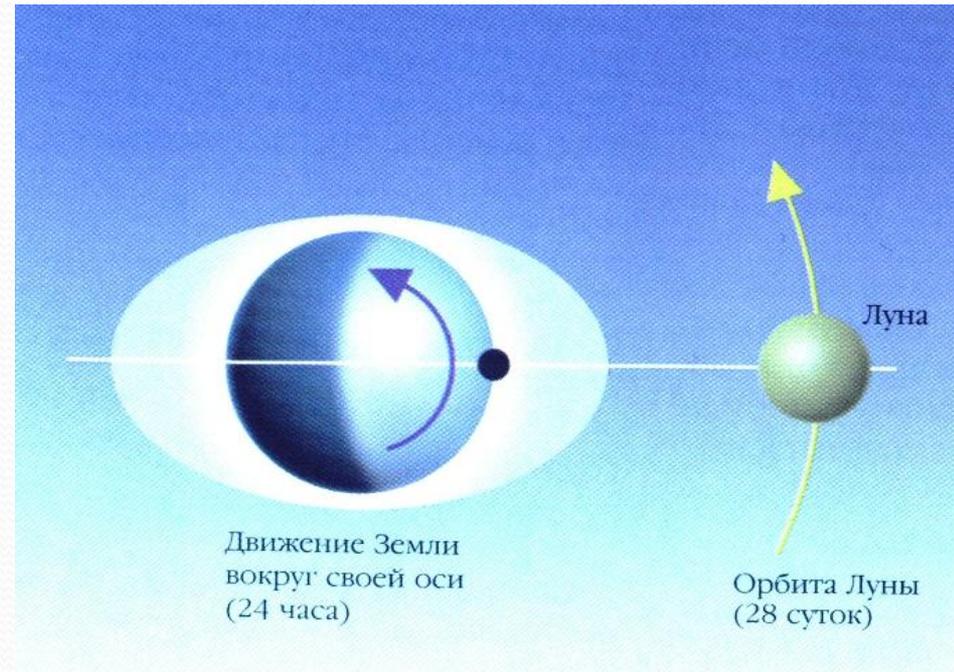
# Приливы и отливы

Приливы – периодические колебания уровня моря (морские приливы), обусловленные силами притяжения Луны и Солнца в соединении с центробежными силами, развивающимися при вращении систем Земля — Луна и Земля — Солнце. Под действием этих же сил происходят деформации твердого тела Земли (земные приливы) и колебания атмосферного давления (атмосферные приливы). Большая из этих сил — лунная — определяет основные черты морских приливов; обычно прилив и отлив бывают 2 раза в сутки.

Максимальное поднятие воды называют полной водой, минимальное — малой водой; величина приливов в открытом океане около 1 м, у берегов до 18 м. В результате земных приливов происходят вертикальные смещения земной поверхности до 50 см, изменения силы тяжести до  $0,25 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$  на экваторе и другие явления, изучение которых позволяет исследовать внутреннее строение Земли и особенности строения земной коры. Атмосферные приливы вызывают полусуточные изменения приземного атмосферного давления и играют большую роль в динамике верхней атмосферы.

# Происхождение приливов

Земля – твёрдое тело, полностью окружённое водами океана. Эффект прилива и отлива в этом случае проявился бы в виде двух утолщений воды – одно со стороны Луны, другое – на противоположной стороне. Повышение уровня воды с ближайшей к Луне стороны объясняется из-за гравитационного притяжения Луны. Труднее объяснить – почему происходит подъём с противоположной стороны. Земля и Луна – два небесных тела, вращающихся вокруг общего центра масс.

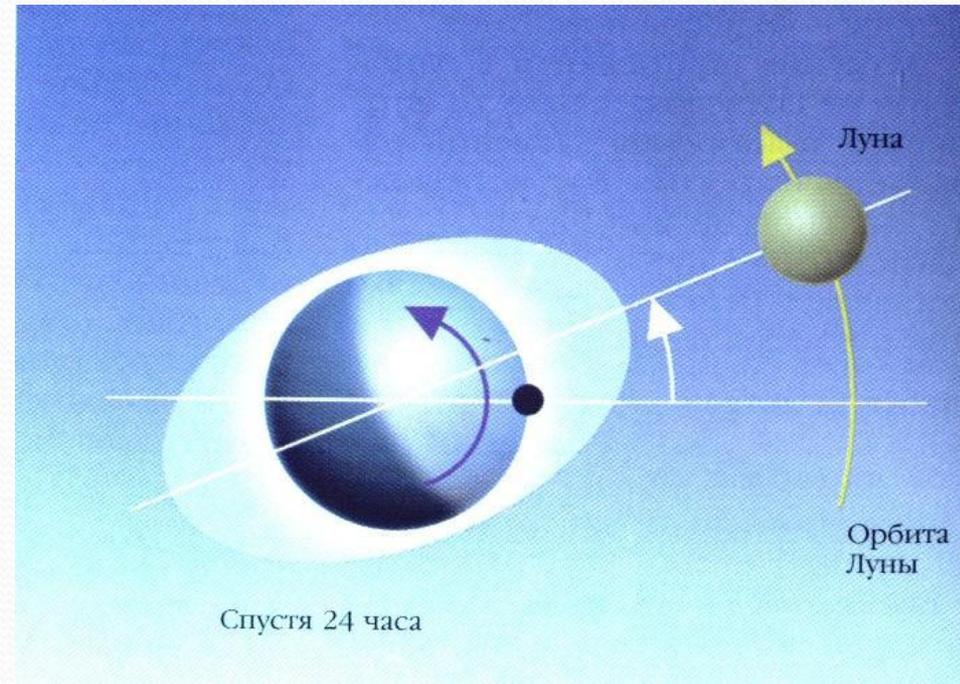


Они вращаются под действием сил притяжения, однако центробежные силы стремятся отдалить их друг от друга. Баланс этих сил не абсолютен. Для воды на противоположной от Луны стороне сила притяжения значительно меньше, и эта вода под действием центробежной силы стремится удалиться от Земли. Поэтому приливы и отливы наблюдаются на двух противоположных сторонах Земли.



# Вращение Земли

За 24 часа Земля совершает один полный оборот вокруг своей оси, Луна обращается вокруг Земли за период равный 28 суткам. Предположим, что мы находимся в точке, где начинается прилив. Земля вращается и через некоторое время уровень воды начинает понижаться, пока не наступает отлив. Примерно через 6 часов уходит на отлив, и через следующие 6 часов наступает новый прилив.

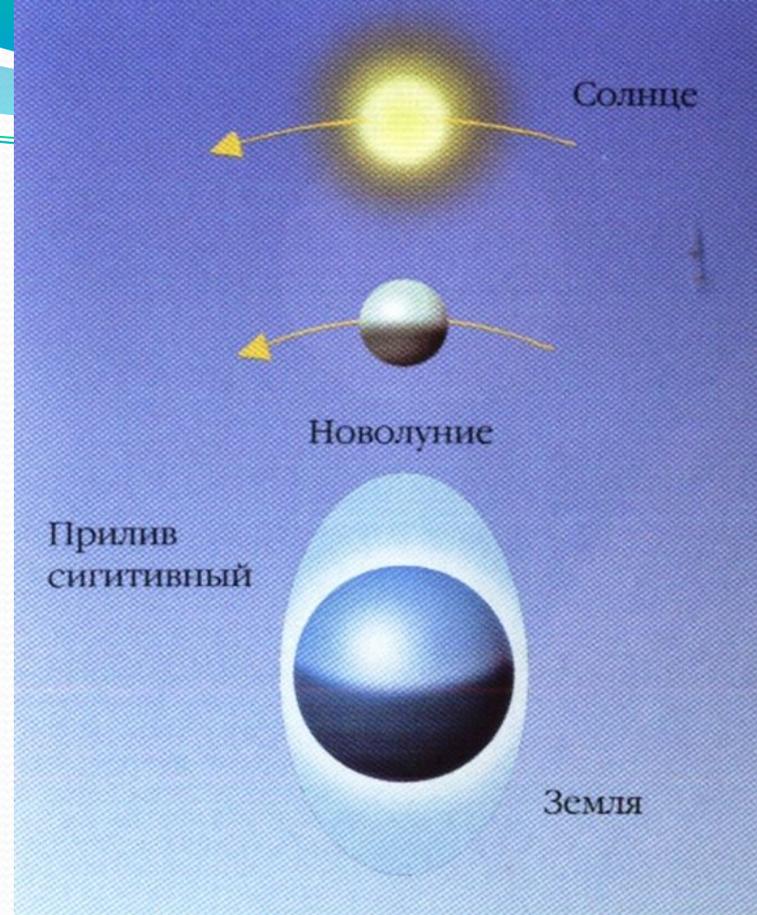


В течении суток происходят два прилива и два отлива. Однако Луна при своем движении над той же точкой Земли оказывается только через 24 часа 50 минут. Поэтому приливы и отливы происходят каждый день с опозданием на 50 минут по сравнению с предыдущим днем.

# Приливы и отливы

- Лунные сутки длиннее солнечных на 50 минут и равны 24 ч 50 мин.
- Лунные приливы два раза в сутки сменяются отливами и на отдельных участках побережий в заливах достигают высоты 10—12 м (макс. 18 м – залив Фанди)
- Лунные приливы могут суммироваться с солнечными в периоды нахождения небесных тел на одной линии в новолуние и полнолуние – **сизигийные приливы**, вычитаются в первой и последней четверти – **квадратурные приливы**
- Первые на 40% выше вторых

# ОТЛИВЫ



Если Солнце и Луна составляют прямой угол по отношению к Земле, то в этом случае повышение уровня воды минимальное, как и влияние Солнца – минимальное.

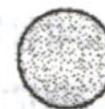
Во время полнолуния или новолуния фиксируется максимальная разница между уровнем воды при отливе и приливе. Земля, Луна, Солнце в это время находятся практически на одной линии, и влияние Солнца усиливает действие Луны. Наблюдаются так называемые сигитивные приливы и отливы.

# Гравитационное воздействие Луны

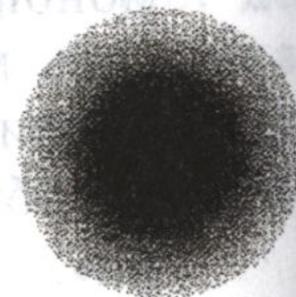
## Сизигийные приливы

Максимальная высота прилива

Солнце



Луна



Отлив

Гравитационное притяжение

Луна

Прилив

Прилив



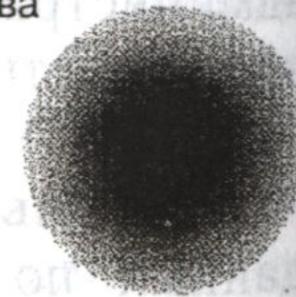
Отлив

## Квадратурные приливы

Минимальная высота прилива

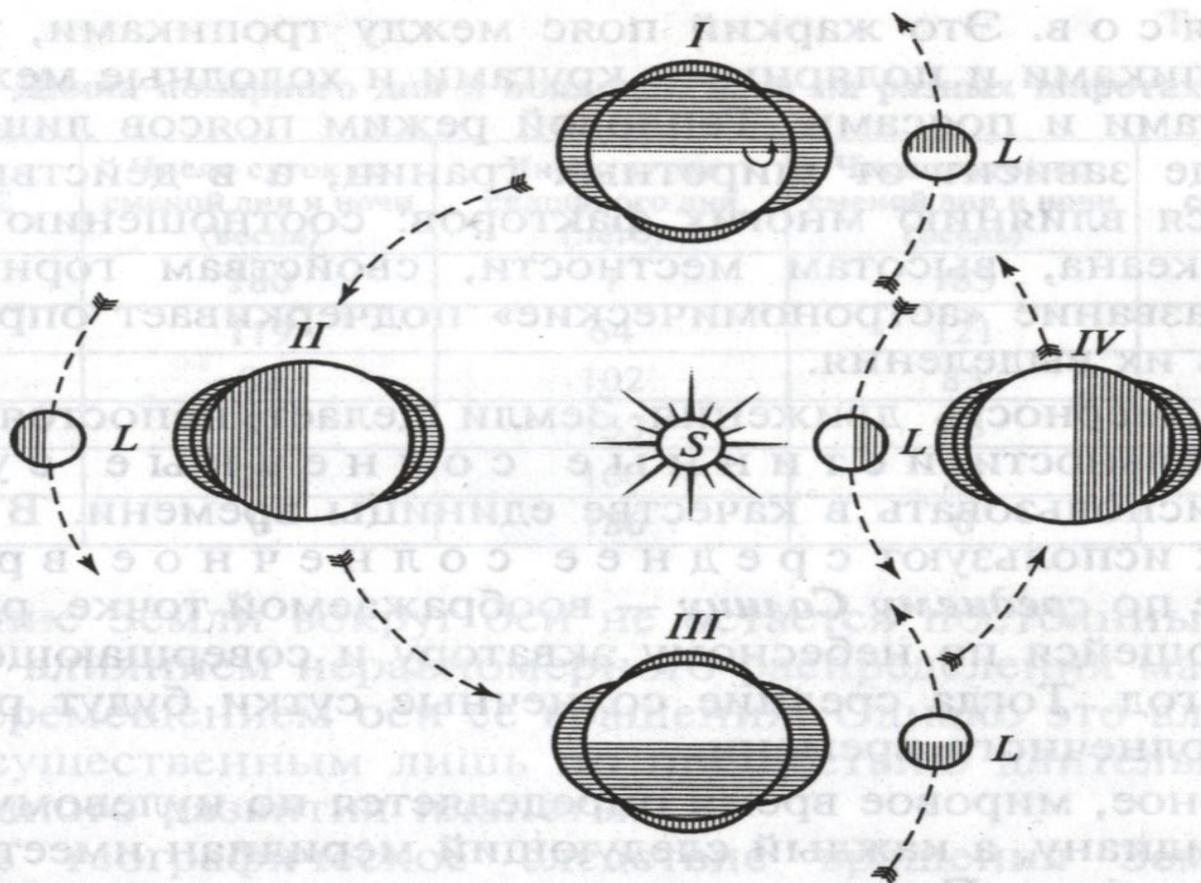
Солнце

Луна

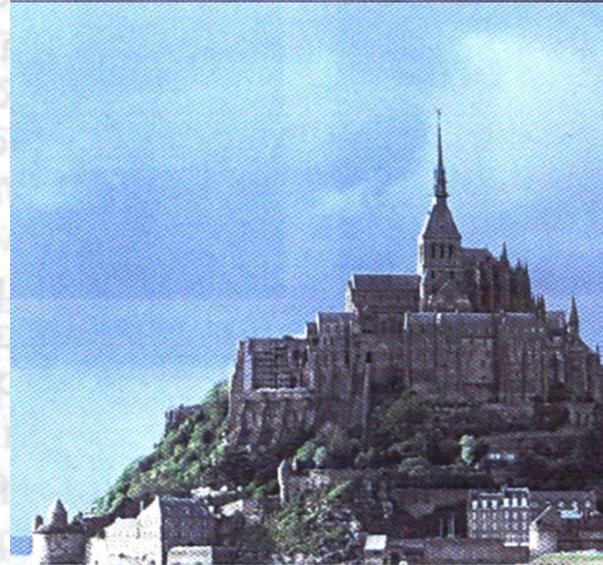
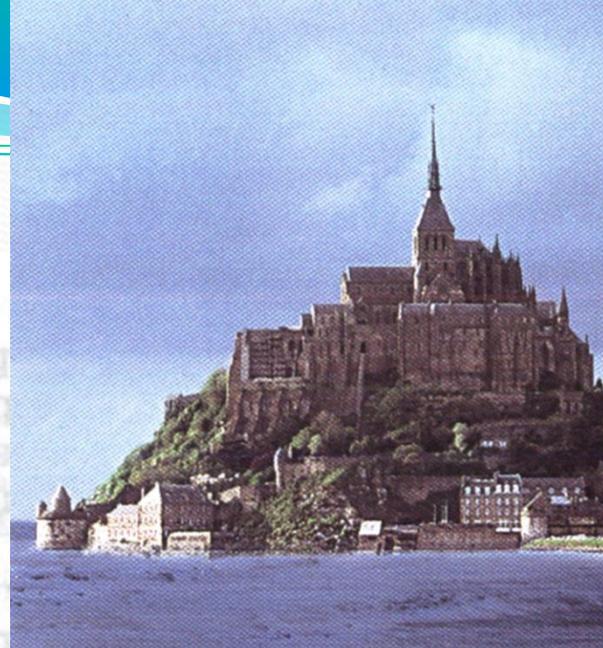


Возникновение приливов

# Приливы и отливы



Р и с. 2.5. Сложение приливов





# Значение приливов

Земля тоже оказывает притяжение по отношению к Луне. Это действие взаимное — Луна и Земля влияют друг на друга. Но поверхность Луны твёрдая, на ней нет воды. Под влиянием силы притяжения Земли Луна имеет неярко выраженную сферическую форму, Луна несколько вытянута в направлении нашей планеты. Кроме того, сила, вызывающая приливы на поверхности Земли, несколько замедлила скорость вращения Луны вокруг своей оси. Луна все время повернута к земной поверхности одной и той же стороной.

## Приливы оказывают значительное влияние на

- развитие органического мира побережий
- рельефообразующие процессы
- на использование ресурсов моря населением прибрежных районов
- замедляют суточное вращения Земли на 0,0016 с за 100 лет.

# Эффект приливов и отливов во Вселенной

Эффект приливов и отливов характерен не только для системы Земля — Луна. Например, Юпитер, вызывает приливы и отливы на своём спутнике Ио. Юпитер настолько разогревает Ио, что она становится нестабильным небесным телом, на ней нередко происходят извержения вулканов. Подобное разрушительное воздействие приливов и отливов может помешать приближению космических аппаратов в будущем к очень плотным и компактным небесным телам, таким, например, как нейтронные звезды. **Нейтронные звезды — маленькие сверхплотные тела.** Масса их примерно равна массе Солнца. Радиус составляет примерно десять километров. Они обладают очень мощным гравитационным полем, которое вызывает эффект приливов и отливов, разрушая все, что приближается к их поверхности на расстояние нескольких тысяч километров.

# Определение массы Земли и небесных тел

Определите массу Сатурна (в массах Земли), если известно, что спутник Сатурна Титан отстоит от него на расстоянии 1220 тыс. км и обращается с периодом 16 суток.

Дано:

$$a = 1220 \cdot 10^3 \text{ км}$$

$$T = 16 \text{ суток}$$

$$a_{\text{л}} = 384 \cdot 10^3 \text{ км}$$

$$T_{\text{л}} = 27,3 \text{ суток}$$

$$M_3 = 1$$

$$M_{\text{с}} = ?$$

$$\frac{T^2(M_{\text{с}} + m_{\text{т}})}{T_{\text{л}}^2(M_3 + m_{\text{л}})} = \frac{a^3}{a_{\text{л}}^3}$$

$$\frac{M_{\text{с}}}{M_3} = \frac{T_{\text{л}}^2}{T^2} \cdot \frac{a^3}{a_{\text{л}}^3}$$

$$M_{\text{с}} = \frac{T_{\text{л}}^2}{T^2} \cdot \frac{a^3}{a_{\text{л}}^3} \cdot M_3$$

$$M_{\text{с}} = \left( \frac{27,3 \text{ суток}}{16 \text{ суток}} \right)^2 \cdot \left( \frac{1220 \cdot 10^3 \text{ км}}{384 \cdot 10^3 \text{ км}} \right)^3 \cdot 1 = 93,4 M_3$$

Определите массу Плутона, если известно, что Харон отстоит от Плутона на расстоянии 19,7 тыс. км и обращается с периодом 6,4 суток.

Дано:

$$a = 19,7 \cdot 10^3 \text{ км}$$

$$T = 6,4 \text{ суток}$$

$$a_{\text{л}} = 384 \cdot 10^3 \text{ км}$$

$$T_{\text{л}} = 27,3 \text{ суток}$$

$$M_3 = 1$$

$$M_{\text{х}} = ?$$

$$\frac{T^2(M_{\text{п}} + m_{\text{х}})}{T_{\text{л}}^2(M_3 + m_{\text{л}})} = \frac{a^3}{a_{\text{л}}^3}$$

$$\frac{M_{\text{п}}}{M_3} = \frac{T_{\text{л}}^2}{T^2} \cdot \frac{a^3}{a_{\text{л}}^3}$$

$$M_{\text{п}} = \frac{T_{\text{л}}^2}{T^2} \cdot \frac{a^3}{a_{\text{л}}^3} \cdot M_3$$

$$M_{\text{п}} = \left( \frac{27,3 \text{ суток}}{6,4 \text{ суток}} \right)^2 \cdot \left( \frac{19,7 \cdot 10^3 \text{ км}}{384 \cdot 10^3 \text{ км}} \right)^3 \cdot 1 = 0,0025 M_3$$

Ответ:

$$M_{\text{с}} = 93,4 M_3$$
$$M_{\text{п}} = 0,0025 M_3$$

# Домашнее задание

§ 9, Вопросы стр.63  
сообщения

«Жизнь и творчество И Ньютона»,  
составить по параграфу тесты в программе «My Test»