



Троянцы Юпитера

4 Титан, луна с атмосферой

1 Мимас, луна кратер

3 Ганимед, луна-гигант

2 Европа, глобальный океан

2 Энцелад, луна

1 Ио, луна-вулкан

3 Тетия, ледяная луна

Главный астероидный пояс

Троянцы Марса

Деймос

Марс

4 Каллисто, луна-бомба

5 Гиперион, луна

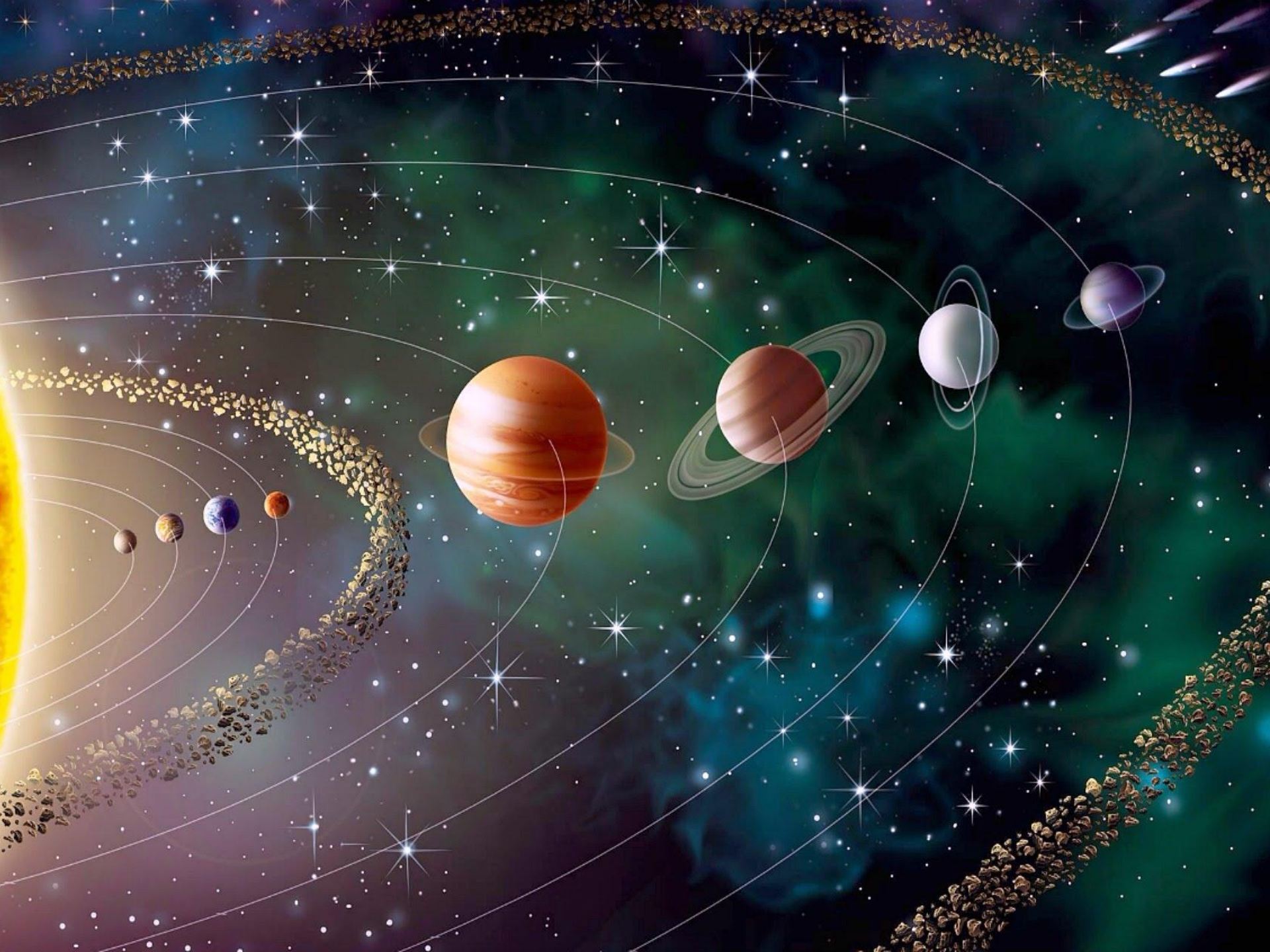
Венера

Земля

Луна

Меркурий

Солнце





# Вопросы для самоконтроля

1. Почему на звёздных картах не указывают положение планет?
2. Какие планеты относятся к нижним?
3. Какие планеты относятся к верхним?
4. Почему соединения не считают удобными конфигурациями для наблюдения нижних и верхних планет?
5. Во время каких конфигураций хорошо видны верхние планеты?
6. Во время каких конфигураций хорошо видны нижние планеты?
7. Какие планеты могут пройти (не могут пройти) по диску Солнца?
8. В какой конфигурации и почему удобнее всего наблюдать Марс?
9. Какие планеты могут быть видны рядом с Луной во время полнолуния?
10. Кто впервые дал правильную схему строения Солнечной системы?
11. Укажите на КЗН положение Луны 7.02.2022
12. Как часто повторяются противостояния Марса, сидерический (звёздный) период которого 1,9 года? ( $S \approx 2,1$  года)
13. Через какой промежуток времени встречаются на циферблате часов минутная и часовая стрелки (1  $\frac{1}{11}$  ч.)
14. Звёздный период обращения Юпитера равен 12 годам. Через какой промежуток времени повторяются его противостояния? (1,09 года=398 сут.)

## 2.2 Законы движения небесных тел

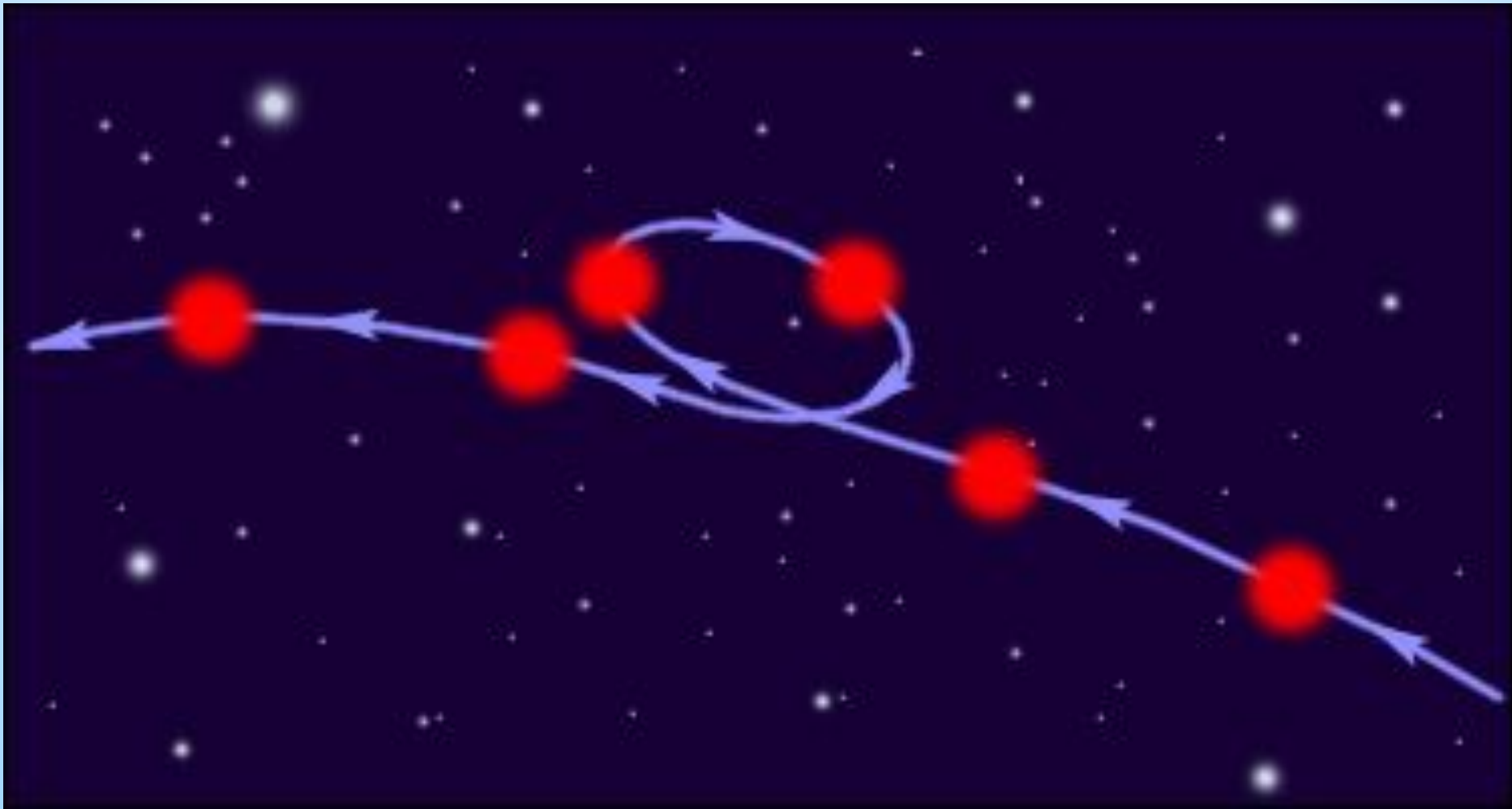
- Законы Кеплера:
  - первый закон Кеплера
  - второй закон Кеплера
  - третий закон Кеплера
- Закон всемирного тяготения
- Уточнённые Ньютоном законы Кеплера
- Космические скорости
- Искусственные спутники Земли

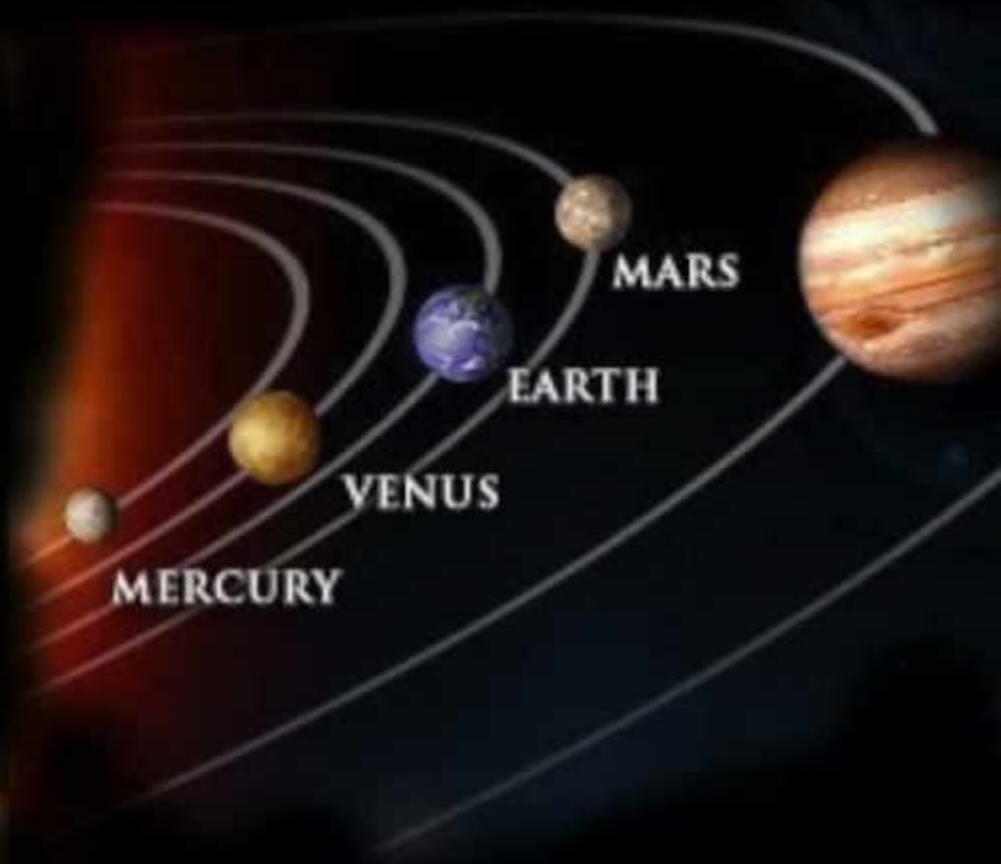
§§ 12,14 ОК 2.2; Упр.10(1,2), упр. 12(1); стр.70, 71 задачи; КЗН, вопросы для самоконтроля.

Литература:

Б.А.Воронцов-Вельяминов, Е.К.Страут. «Астрономия. Базовый уровень», Москва, изд. «Дрофа», 2018 год.

Геоцентрическая система Птолемея продержалась более 14 столетий и только в середине XVI века была заменена **гелиоцентрической системой Коперника**. В системе Коперника траектории планет оказались более простыми. Немецкий астроном **И. Кеплер** в начале XVII века на основе системы Коперника сформулировал **три эмпирических закона** движения планет Солнечной системы. Кеплер использовал результаты наблюдений за движением планет датского астронома **Т. Браге**.





# Первый закон Кеплера, 1609 год.

Все планеты движутся по эллиптическим орбитам, в одном из фокусов которых находится Солнце.

На рисунке показана эллиптическая орбита планеты, масса которой много меньше массы Солнца. Солнце находится в одном из фокусов эллипса.

**Перигелий** – ближайшая к Солнцу точка орбиты (P).

**Афелий** – наиболее удаленная от Солнца точка орбиты (A).

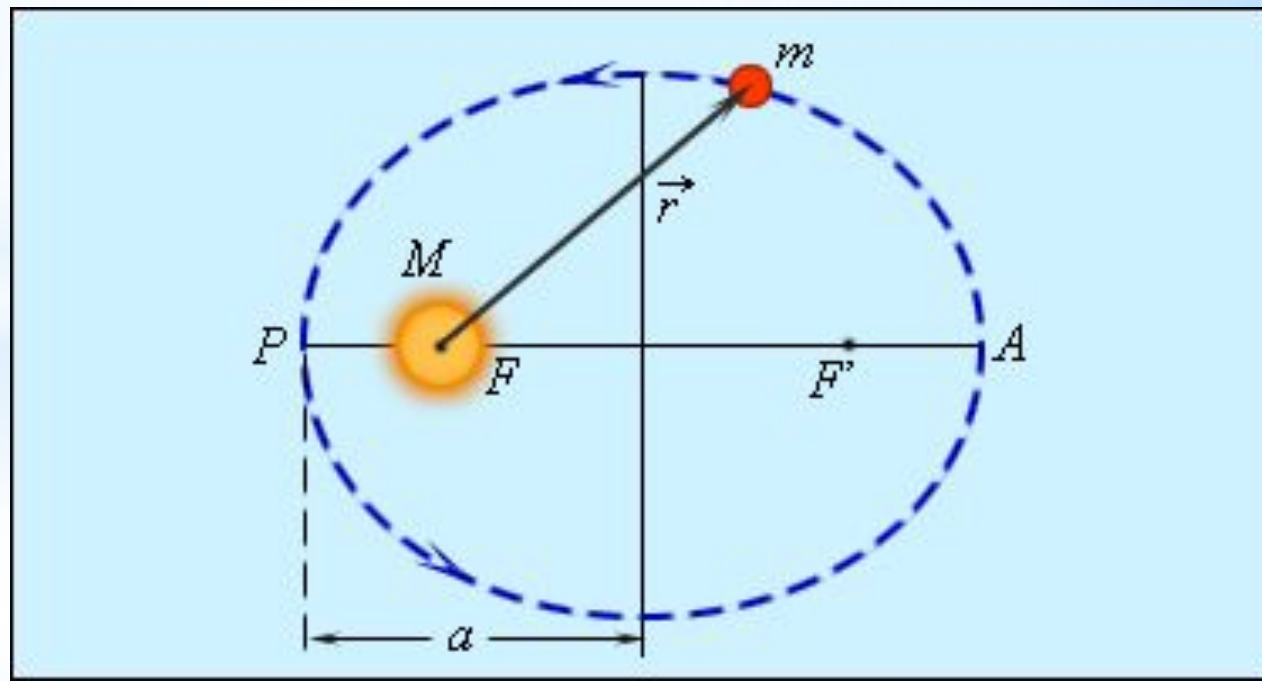
$r$  – радиус-вектор планеты.

Расстояние между афелием и перигелием – большая ось эллипса.

Среднее расстояние от Земли до Солнца:  $1 \text{ а.е.} = 149600000 \text{ км}$ .

Ближайшая к Земле точка орбиты Луны или искусственного спутника Земли называется **перигеем**, а наиболее удалённая – **апогеем** (др. греч. Гея или Ге – Земля).

Эллиптическая орбита планеты массой  $m \ll M$ ;  
 $a$  – длина большой полуоси,  
 $F$  и  $F'$  – фокусы орбиты

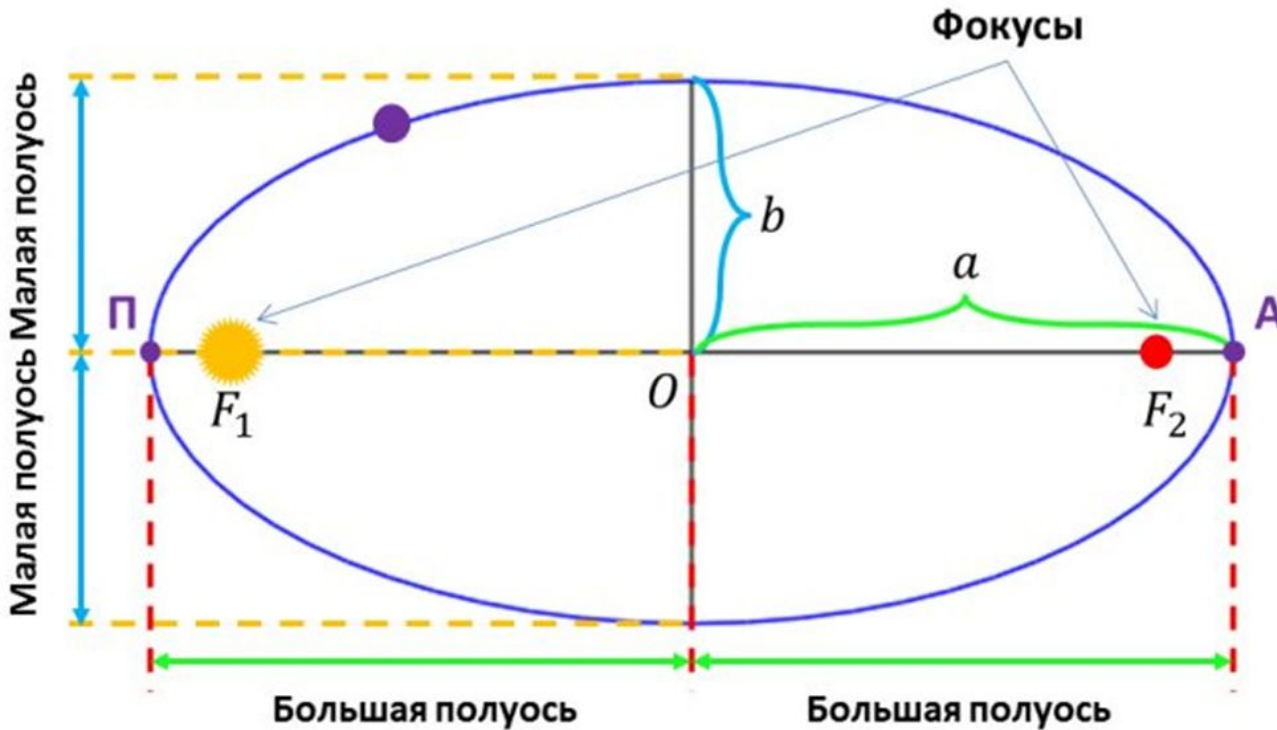




# Первый закон Кеплера, 1609 год.

Все планеты движутся по эллиптическим орбитам, в одном из фокусов которых находится Солнце.

На рисунке показана эллиптическая орбита планеты:



$\Pi$  – перигелий – ближайшая к Солнцу точка орбиты

$A$  – афелий – наиболее удаленная от Солнца точка орбиты

$a$  – большая полуось  
 $b$  – малая полуось  
 $F_1$  и  $F_2$  – фокусы эллипса

Эксцентриситет

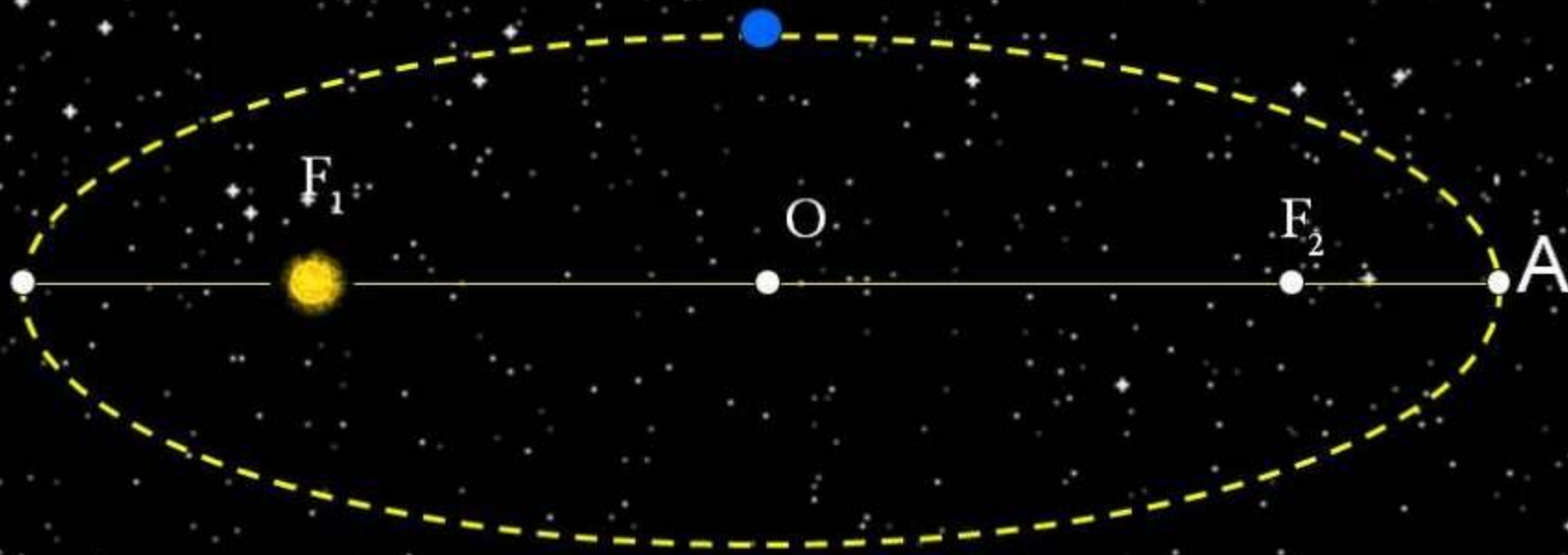
$$e = \frac{OF_1}{a} = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$

$e = 0$  – окружность

$0 < e < 1$  – эллипс

Чем больше  $e$ , тем орбита более «вытянута»

# Первый закон Кеплера



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

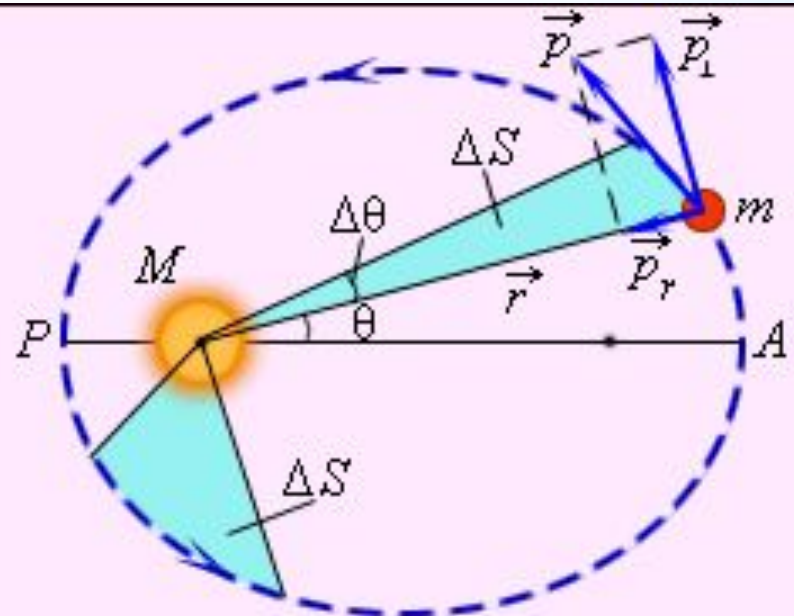
# Второй закон Кеплера, 1609 год

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

Планета движется вокруг Солнца неравномерно.

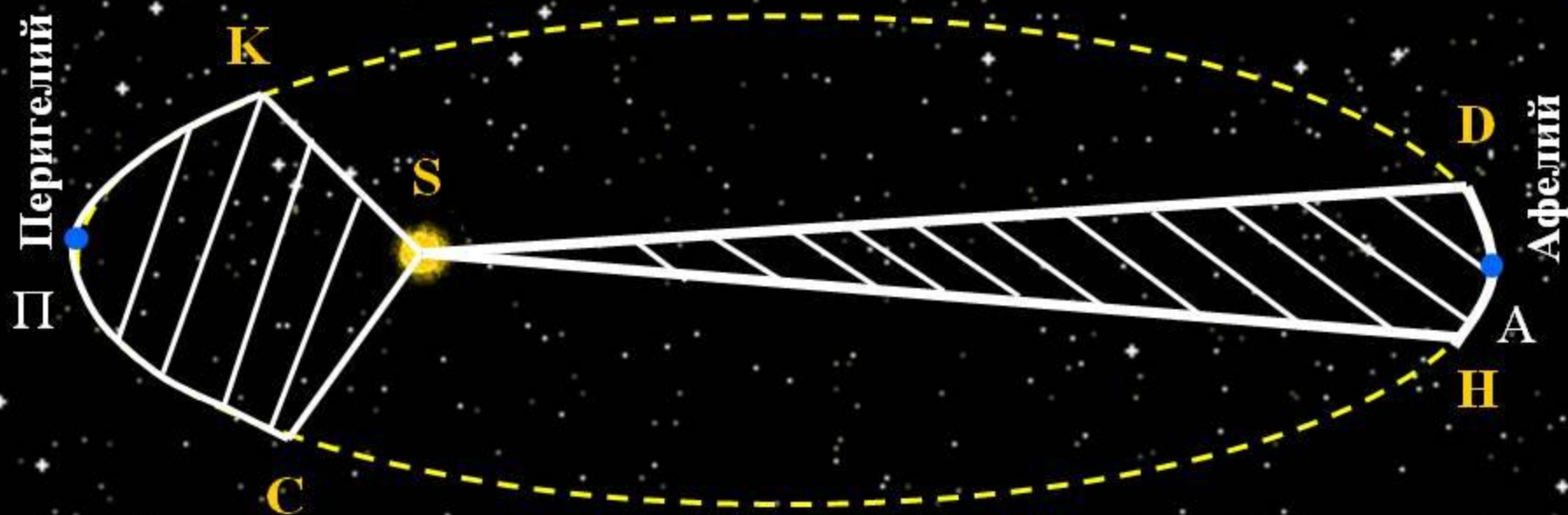
Линейная скорость планеты вблизи перигелия больше, чем вблизи афелия.

Второй закон Кеплера эквивалентен закону сохранения момента импульса.



Второй закон Кеплера – закон площадей.

# Второй закон Кеплера



Площади SKC и SDH равны.

Линейная скорость планеты вблизи перигелия больше, чем вблизи афелия.

# Третий закон Кеплера, 1619 год.

Квадраты звёздных периодов обращения планет относятся как кубы больших полуосей их орбит.

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

$T_1$  и  $T_2$  – периоды обращений планет,  
 $a_1$  и  $a_2$  – большие полуоси планет.

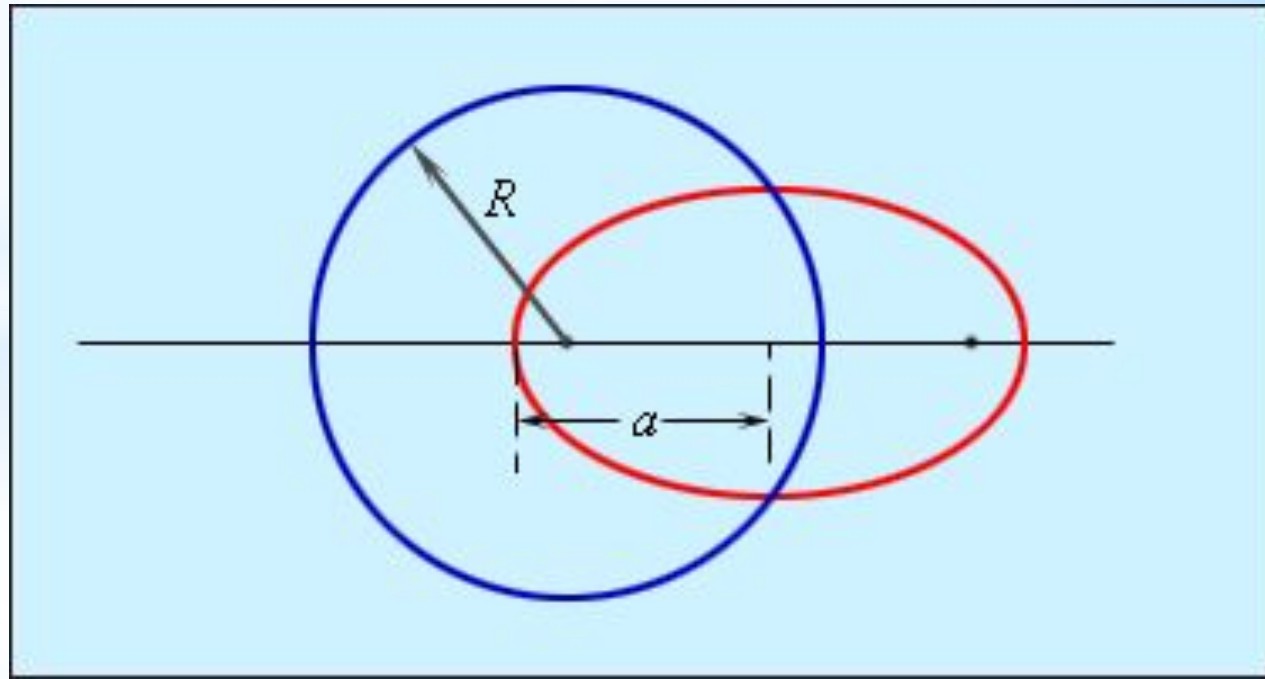
Третий закон Кеплера выполняется для всех планет Солнечной системы с точностью выше 1 %.

Для Земли:

$T_3 = 1$  год

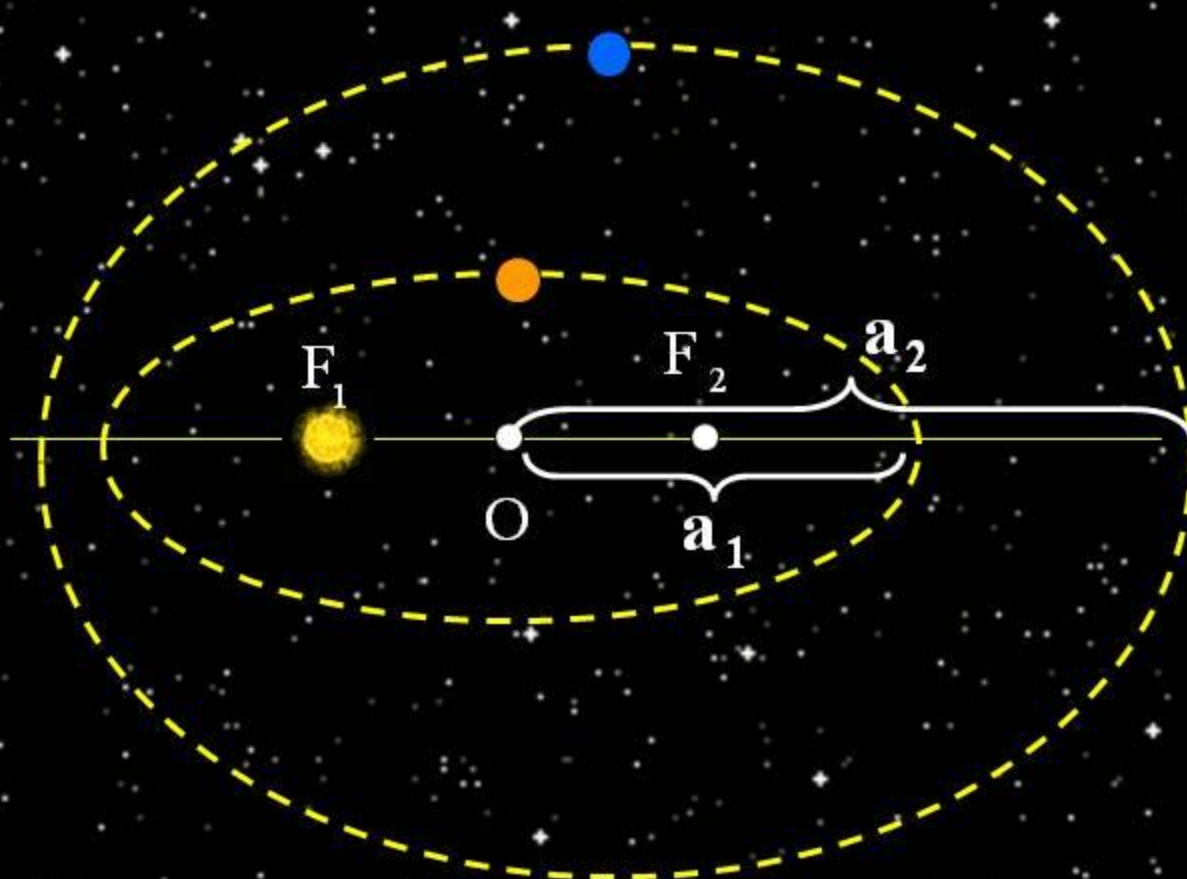
$a_3 = 1$  а.е.

Круговая и эллиптическая орбиты.  
При  $R = a$  периоды обращения тел по этим орбитам одинаковы.



# Третий закон Кеплера

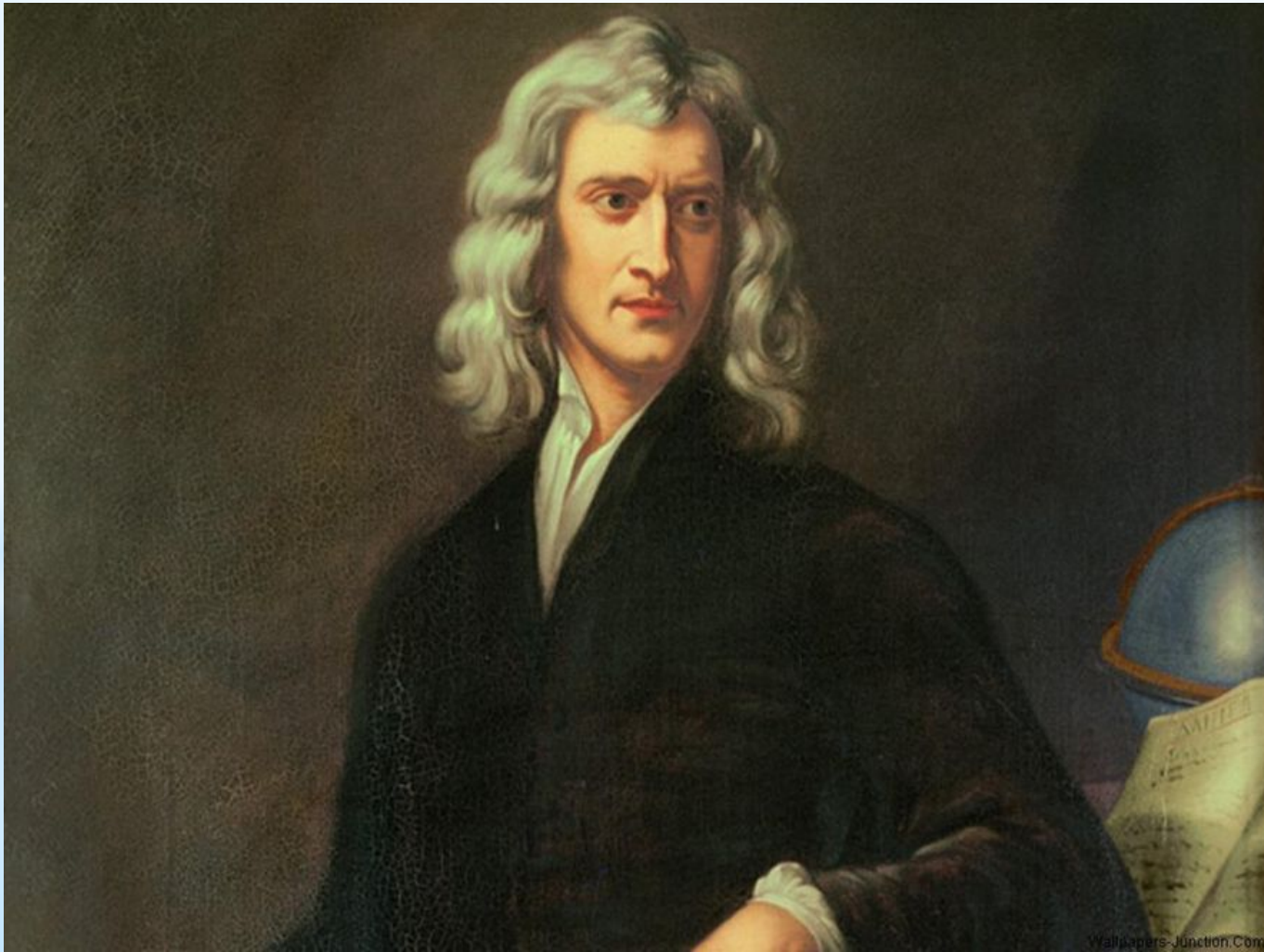
Квадраты звёздных периодов обращения двух планет относятся как кубы больших полуосей их орбит.



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

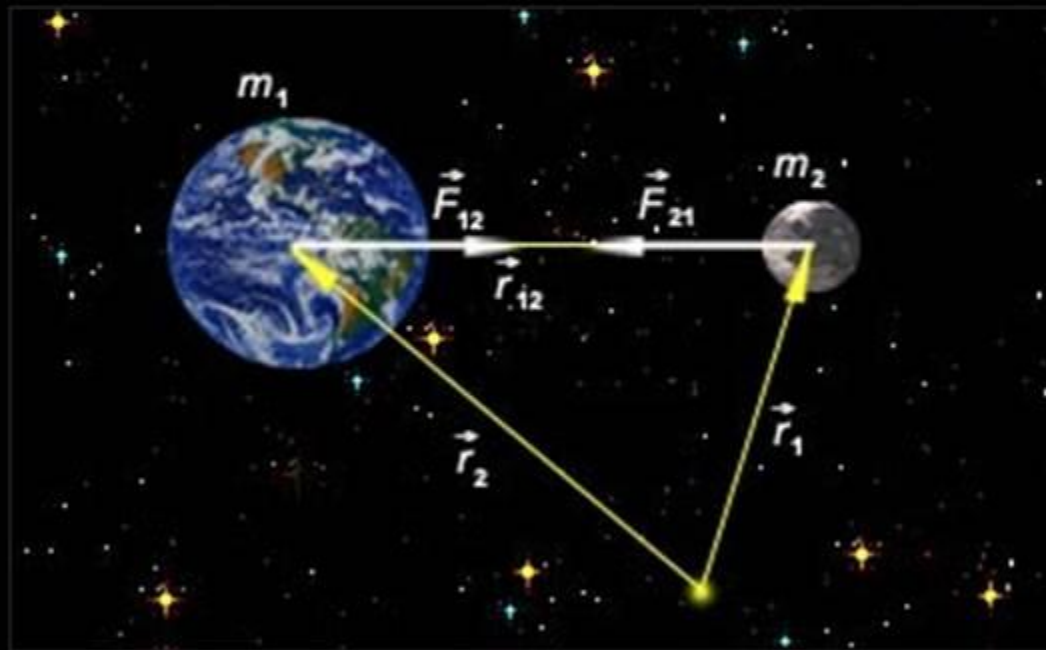
Несмотря на то, что законы Кеплера явились важнейшим этапом в понимании движения планет, они все же оставались только эмпирическими правилами, полученными из астрономических наблюдений.

Законы Кеплера объясняют, **как** движутся планеты. Английский математик и естествоиспытатель Исаак Ньютон (1642 – 1717) сформулировал закон, который объясняет, **почему** планеты движутся именно так. В 1682 году он сформулировал **закон всемирного тяготения**.



**Законы Кеплера и закон всемирного тяготения –  
основные законы небесной механики.**

Если законы Кеплера отвечают на вопрос,  
по каким траекториям движутся небесные тела,  
то закон всемирного тяготения отвечает на вопрос,  
какая сила удерживает планеты около Солнца и спутники около планет.



Закон всемирного тяготения

Если  $m_1$  и  $m_2$  –  
массы двух точечных тел,  
а  $r$  – расстояние между ними,  
то закон всемирного тяготения  
записывается в виде:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$
$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$$

где  $G$  – гравитационная постоянная



# Обобщённые Ньютоном законы Кеплера

Первый обобщённый закон Кеплера:

Под действием силы тяготения одно небесное тело может двигаться по отношению к другому по окружности, эллипсу, параболе и гиперболе.

Второй закон не потребовал обобщения.

Третий обобщённый закон Кеплера:

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

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

Уточнённый третий закон Кеплера можно применять не только к системам «звезда-планеты», но и к системам «звезда-планета, планета-спутник».

# Космические скорости

Указаны скорости вблизи поверхности Земли.

1  $\Rightarrow v_1 = 7,9 \cdot 10^3$  м/с; круговая траектория;

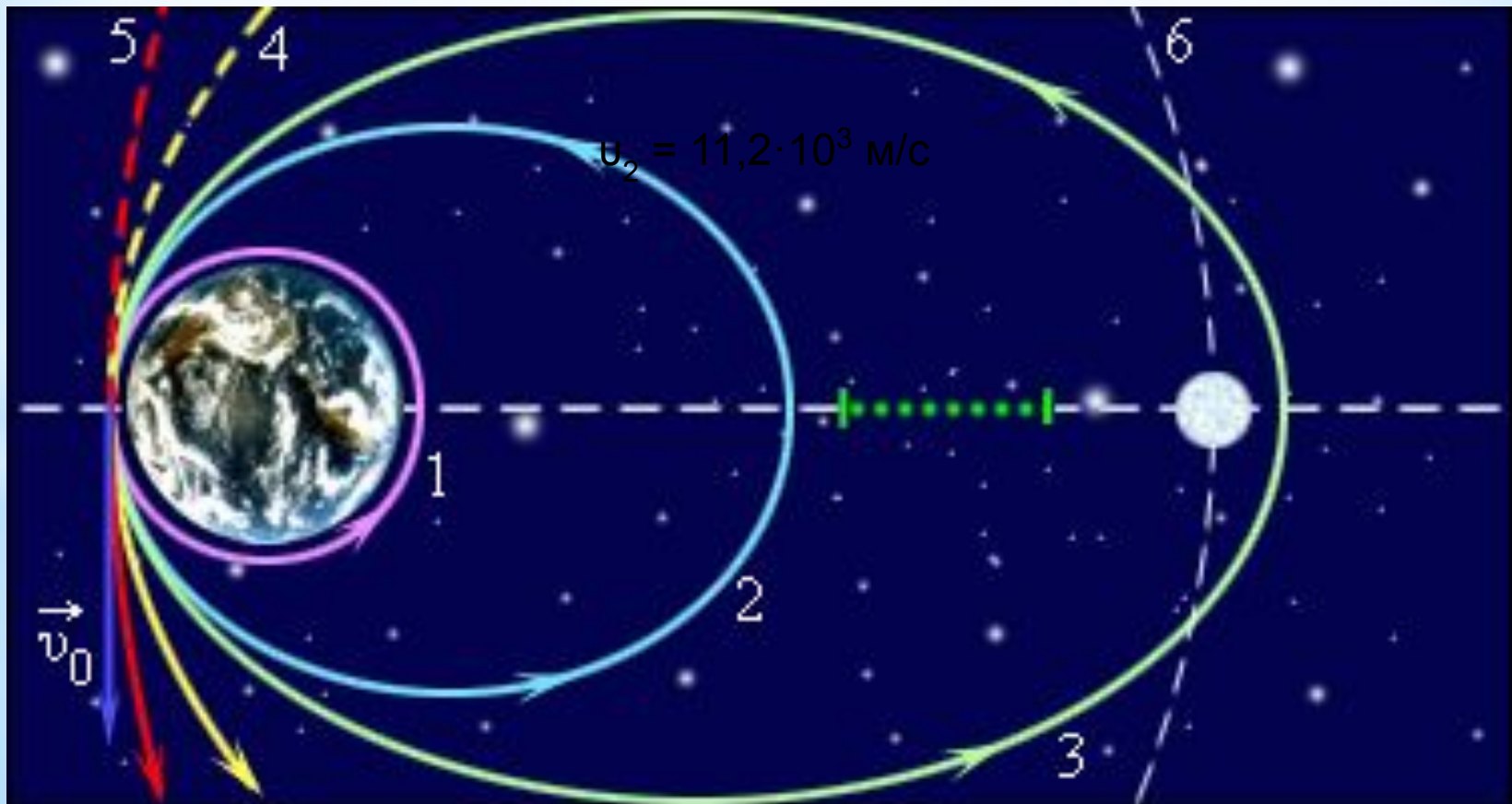
2  $\Rightarrow v_1 < v < v_2$  – эллиптическая траектория;  $v_2 = 11,1 \cdot 10^3$  м/с;

3  $\Rightarrow v_2 = 11,1 \cdot 10^3$  м/с – сильно вытянутый эллипс;

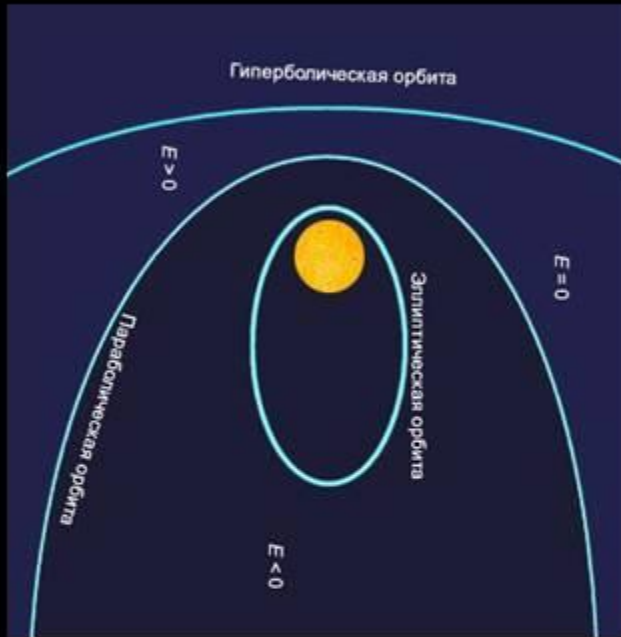
4  $\Rightarrow v > v_2$  – параболическая траектория;  $v_2 = 11,2 \cdot 10^3$  м/с;

5  $\Rightarrow v_3 \approx 12,0 \cdot 10^3$  м/с – гиперболическая траектория;

6  $\Rightarrow$  траектория Луны.



Орбита движения искусственных спутников зависит от начальной скорости. Критическая скорость, при которой происходит движение по параболе, называют **параболической** скоростью.



Движение тел  
в гравитационном поле



© ООО ФИЗИКОН, 2003



© ООО ФИЗИКОН, 2003

Чтобы навсегда покинуть Землю, тело у поверхности Земли должно иметь скорость не меньше **11,2 км/с**. Тело, стремящееся навсегда покинуть Солнечную систему и находящееся на орбите Земли, должно иметь скорость не меньше **42,1 км/с**.

# Вопросы для самоконтроля

1. Что называется перигеем, апогеем?
2. Что называется перигелием, афелием?
3. Сформулируйте законы, лежащие в основе небесной механики.
4. На чём основывался Кеплер, открывая свои законы?
5. В чём заключается обобщение Ньютоном законов Кеплера?
6. Какую важную физическую характеристику можно вычислить из обобщённого Ньютоном третьего закона Кеплера?

# Образец решения задачи

Большая полуось Венеры 0,7 а.е. Чему равен звёздный период её обращения вокруг Солнца?

Дано:

$$a_3 = 1 \text{ а.е.}$$

$$T_3 = 1 \text{ год}$$

$$a_B = 0,7 \text{ а.е.}$$

$$T_B = ?$$

Решение:

$$\frac{T_3^2}{T_B^2} = \frac{a_3^3}{a_B^3} \Rightarrow T_B^2 = \frac{T_3^2 \cdot a_B^3}{a_3^3} \Rightarrow T_B = 0,62 \text{ года} = 224,7 \text{ земных суток.}$$

*(Продолжите преобразования ↑ )*

Ответ:  $T_B = 0,62 \text{ года} = 224,7 \text{ земных суток.}$

# Задачи для самоконтроля

1. Чему равна большая полуось орбиты Урана, если звёздный период обращения этой планеты вокруг Солнца составляет 84 года?
2. Большая полуось орбиты Сатурна 9,5 а.е. Каков звёздный период его обращения вокруг Солнца? Ответ выразить в годах, земных сутках.
3. Большая полуось орбиты Юпитера 5 а.е. Каков звёздный период его обращения вокруг Солнца? Ответ выразить в годах, земных сутках.
4. Звёздный период обращения Юпитера вокруг Солнца составляет 12 лет. Каково среднее расстояние Юпитера до Солнца?
5. Большая полуось орбиты Марса 1,5 а.е. Чему равен звёздный период его обращения вокруг Солнца? Ответ выразить в годах, земных сутках.
6. Большая полуось Венеры 0,7 а.е. Чему равен звёздный период её обращения вокруг Солнца? Ответ выразить в годах, земных сутках.
7. Как изменяется значение скорости движения планеты при её перемещении от афелия к перигелию?
8. В какой точке эллиптической орбиты кинетическая энергия искусственного спутника Земли (ИСЗ) максимальна, а в какой – минимальна?
9. Как происходит видимое движения планет?
10. В какой точке эллиптической орбиты потенциальная энергия искусственного спутника Земли (ИСЗ) минимальна, а в какой – максимальна?



Троянцы Юпитера

4 Титан, луна с атмосферой

1 Мимас, луна кратер

Ганимед, луна-гигант

2 Европа, глобальный океан

3

Сатурн

2 Энцелад, луна

Главный астероидный пояс

Юпитер

1 Ио, луна-вулкан

3 Тетия, ледяная луна

Троянцы Марса

Деймос

Марс

4 Каллисто, луна-бомба

5 Гиперион, луна

Венера

Земля

Луна

Меркурий

Солнце