A composite image of the solar system. In the upper right, a large portion of Earth is visible, showing the African continent and surrounding oceans. In the upper left, Saturn is shown with its prominent rings. In the lower right, the reddish-orange surface of Mars is visible, showing various craters and geological features. The background is a dark space filled with numerous small white stars.

Движение искусственных спутников Земли и космических аппаратов

Строение Солнечной системы

Сегодня на уроке

1

Вспомним, почему искусственные спутники не падают на поверхность Земли при своём движении вокруг неё.

2

Дадим определения первой, второй и третьей космическим скоростям.

3

Выясним, по каким орбитам могут двигаться космические аппараты в зависимости от их начальной скорости.

4

Узнаем, какие орбиты космических аппаратов называются гомановскими.



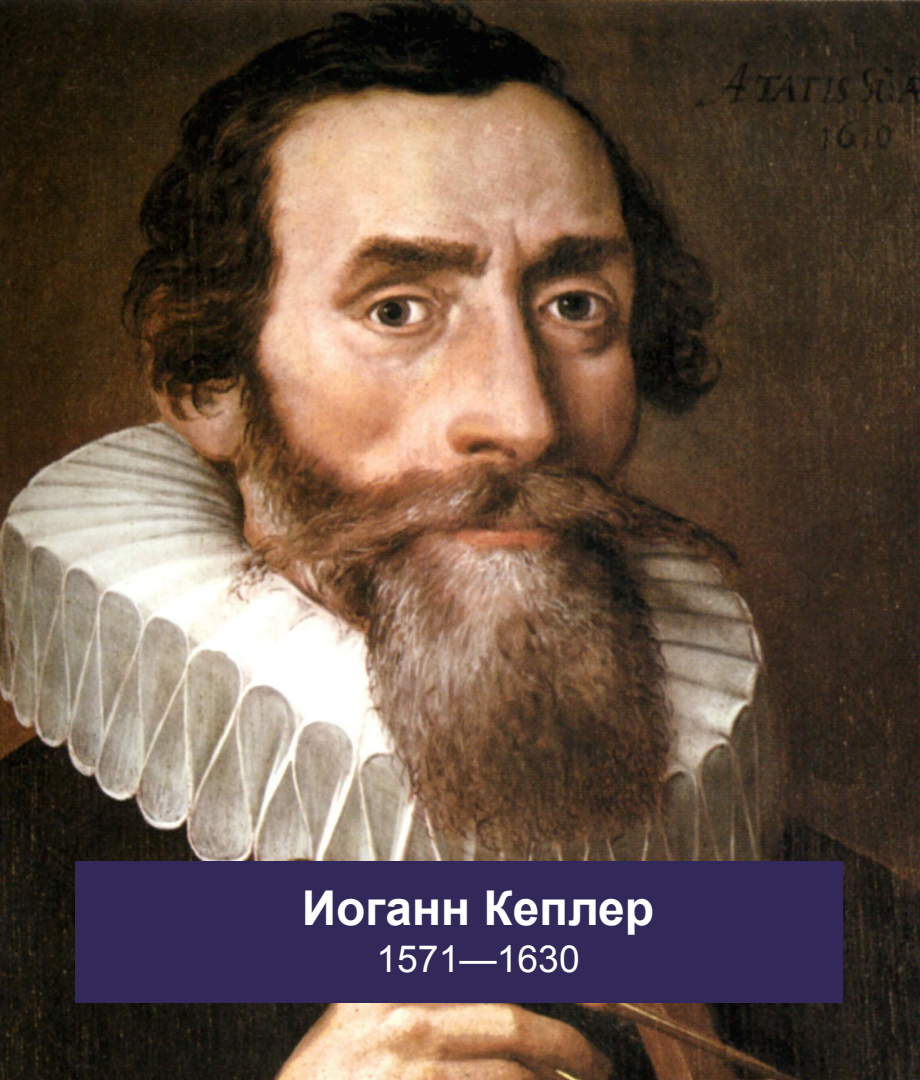
Закон всемирного тяготения

Любые два тела притягивают друг друга силами, прямо пропорциональными произведению масс этих тел и обратно пропорциональными квадрату расстояния между ними.



И. НЬЮТОН

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



Иоганн Кеплер

1571—1630

Первый закон Кеплера (1605):
все планеты движутся по эллиптическим орбитам, в одном из фокусов которых находится Солнце.

Второй закон Кеплера (1602):
радиус-вектор планеты описывает в равные промежутки времени равновеликие площади.

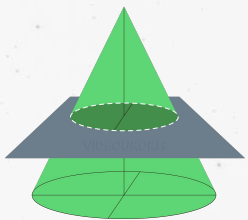
Третий закон Кеплера (1618):
квадраты периодов обращения планет относятся как кубы больших полуосей их орбит:

Первый обобщённый закон Кеплера

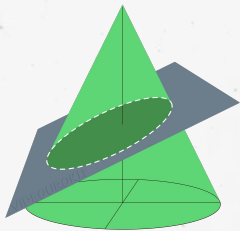
Движение одного небесного тела в поле тяготения другого небесного тела происходит по одному из конических сечений.



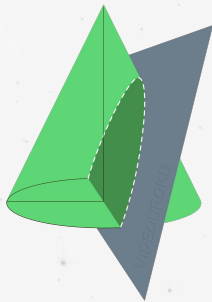
И. Кеплер



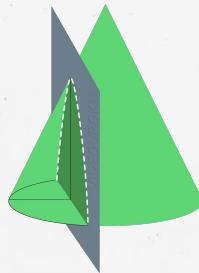
Окружность



Эллипс



Парабола



Гипербола

Третий обобщённый закон Кеплера

Квадраты сидерических периодов спутников, умноженные на сумму масс главного тела и спутника, относятся как кубы больших полуосей орбит спутников.



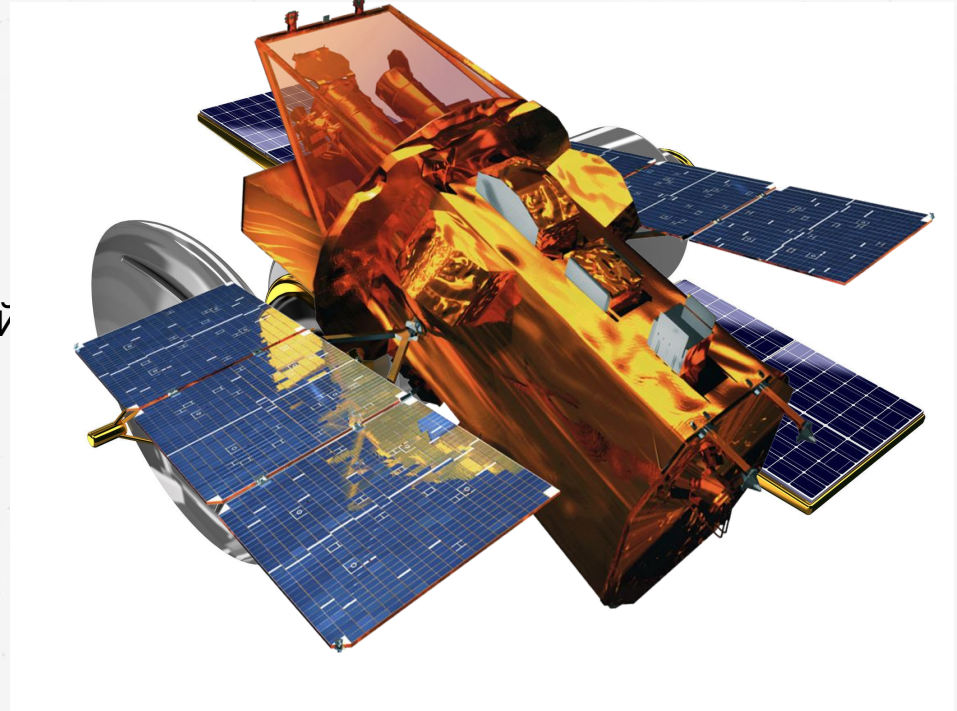
И. Кеплер

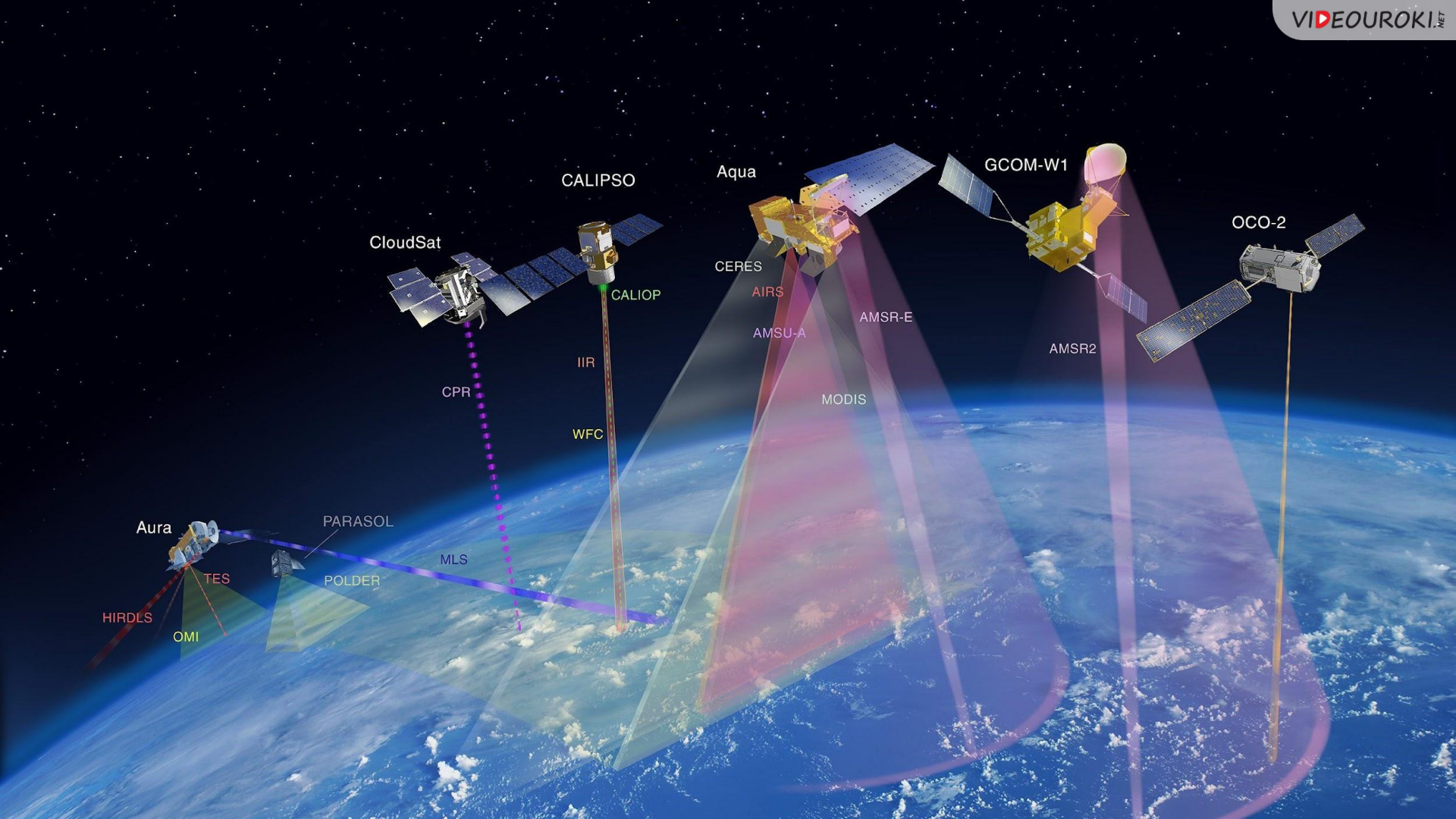
$$\frac{T_1^2(M_1 + m_1)}{T_2^2(M_2 + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$



Движение ИСЗ и КА

Искусственные спутники планет — космические аппараты, созданные людьми, которые позволяют наблюдать за планетой, около которой они вращаются, а также другими астрономическими объектами из космоса.





Движение ИСЗ и КА



И. НЬЮТОН



Движение ИСЗ и КА



И. Ньютон



Движение ИСЗ и КА



И. Ньютон



Движение ИСЗ и КА



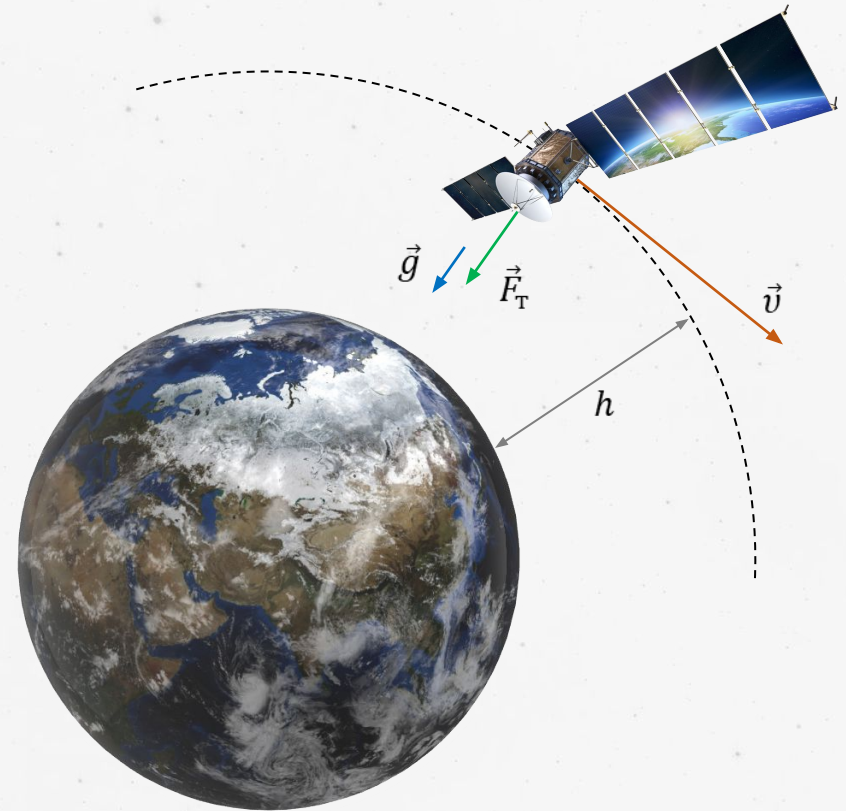
И. Ньютон



Движение ИСЗ и КА

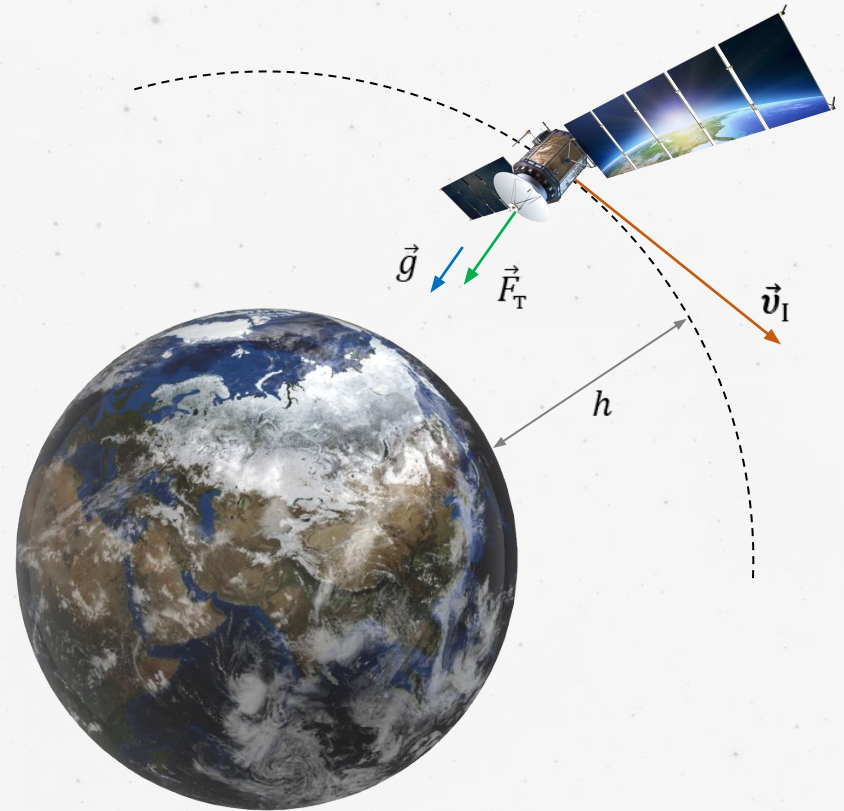
Спутник движется как свободно падающее тело с ускорением свободного падения.

Искусственным спутником Земли может стать любое тело произвольной массы.



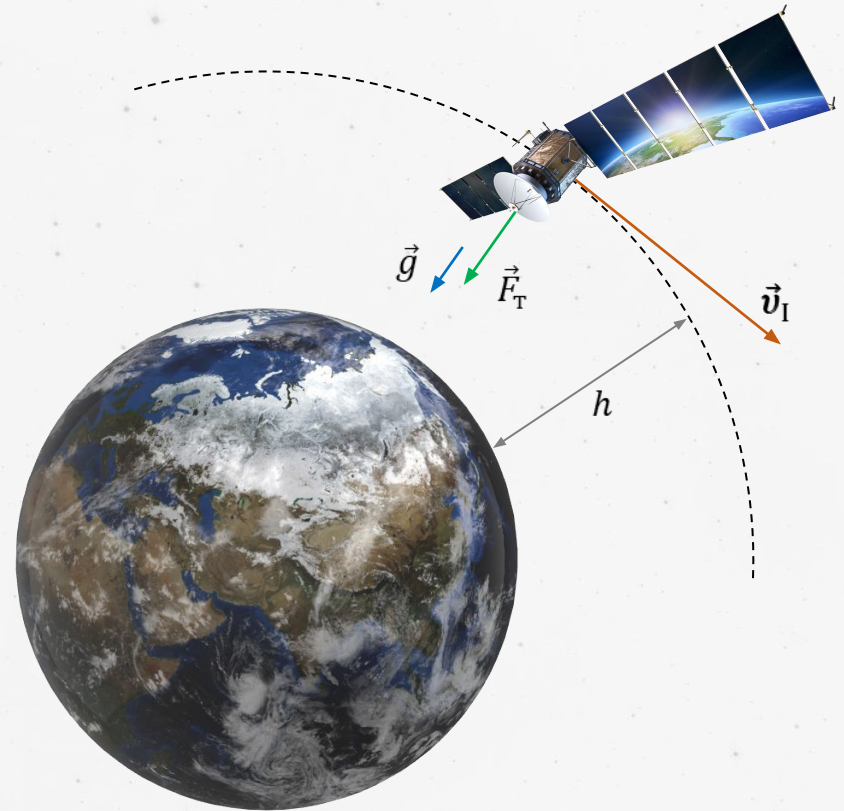
Движение ИСЗ и КА

Скорость, при достижении которой космический аппарат, запускаемый с Земли, может стать её искусственным спутником, называется **первой космической скоростью**.



Движение ИСЗ и КА

Скорость, при достижении которой космический аппарат, запускаемый с Земли, может стать её искусственным спутником, называется **первой космической скоростью**.



Движение ИСЗ и КА

2-й закон Ньютона: $F_{\text{тяг}} = ma_{\text{ц}}$.

Закон всемирного тяготения: $F_{\text{тяг}} = G \frac{M_3 m}{(R_3 + h)^2}$.

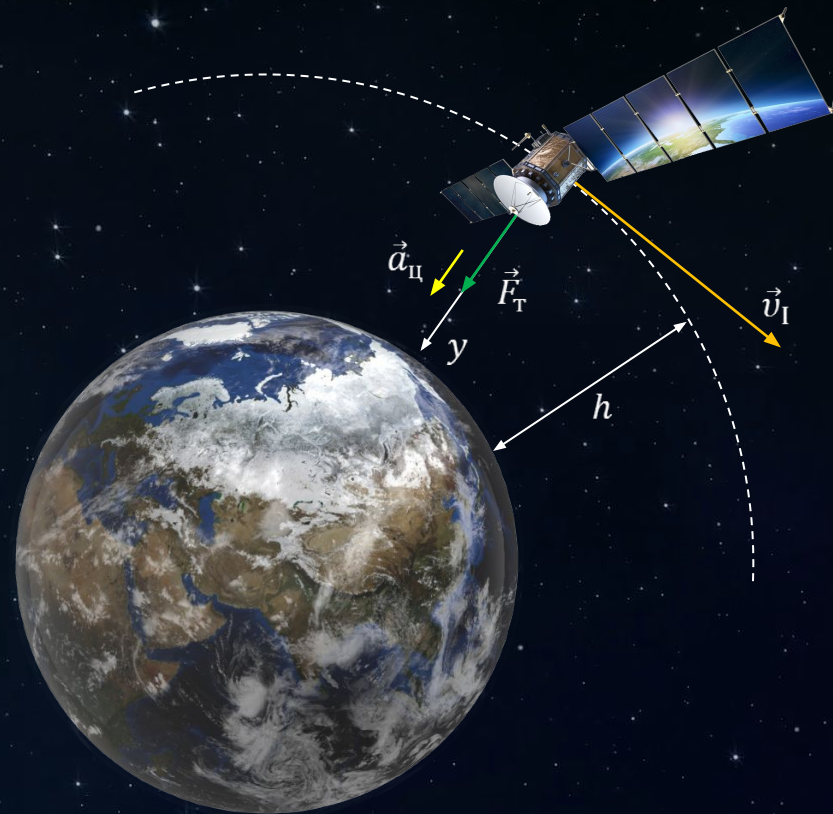
Центростремительное ускорение: $a_{\text{ц}} = \frac{v_1^2}{R_3 + h}$.

Тогда $G \frac{M_3 m}{(R_3 + h)^2} = m \frac{v_1^2}{R_3 + h} \Rightarrow G \frac{M_3}{R_3 + h} = v_1^2$.

1-я космическая скорость: $v_1 = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3 + h}}$.

Если $h \ll R_3$, то $v_1 = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3}} = \sqrt{g_0 R_3}$.

Ускорение свободного падения: $g_0 = G \frac{M_3}{R_3^2}$.



Движение ИСЗ и КА

2-й закон Ньютона: $F_{\text{тяг}} = ma_{\text{ц}}$.

1-я космическая скорость:

Закон всемирного тяготения: $F_{\text{тяг}} = G \frac{M_3 M_3 m}{R_3^2 (R_3 + h)^2}$.

Центростремительное ускорение: $a_{\text{ц}} = \frac{v_1^2}{R_3 + h}$.

Если $h \ll R_3$, то $v_1 = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3}} = \sqrt{g_0 R_3}$.

Тогда $G \frac{M_3 m}{(R_3 + h)^2} = m \frac{v_1^2}{R_3 + h} \Rightarrow G \frac{M_3}{R_3 + h} = v_1^2$.

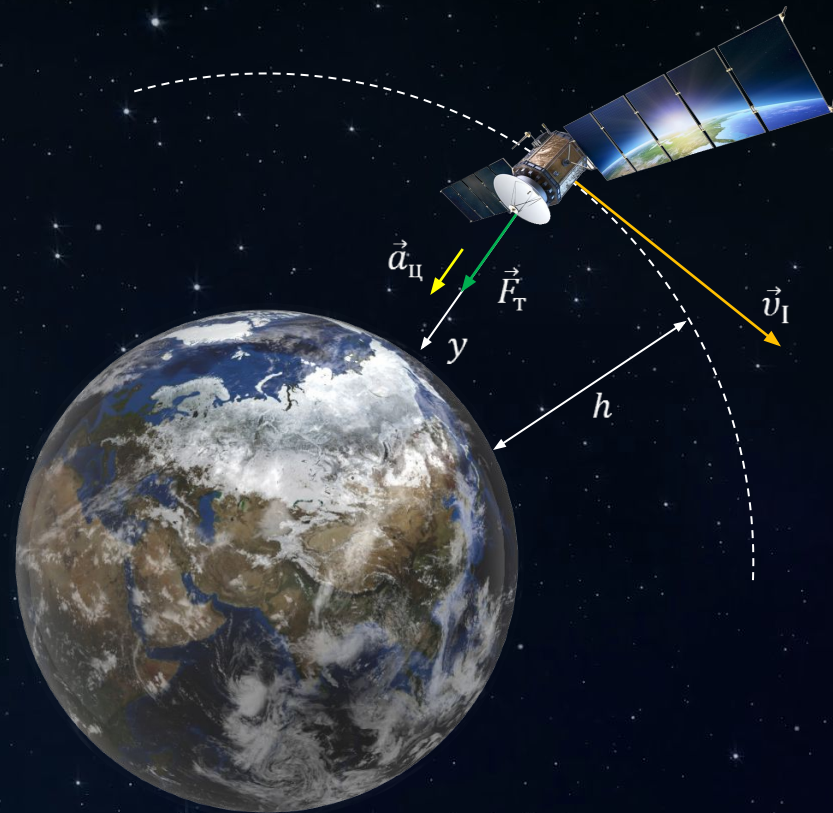
$R_3 = 6371 \cdot 10^3 \text{ м}$; $g_0 = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$

1-я космическая скорость: $v_1 = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3 + h}}$.

Вблизи поверхности Земли:

Если $h \ll R_3$, то $v_1 = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3}} = \sqrt{g_0 R_3}$.

Ускорение свободного падения: $g_0 = G \frac{M_3}{R_3^2} \approx 7,9 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = \frac{M_3}{R_3^2} \cdot \frac{\text{км}}{\text{с}}$.



Движение ИСЗ и КА

Первая космическая скорость:

$$v_1 = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3 + h}} \approx 7,9 \frac{\text{км}}{\text{с}}$$

Почему спутник
не падает на
поверхность
планеты?

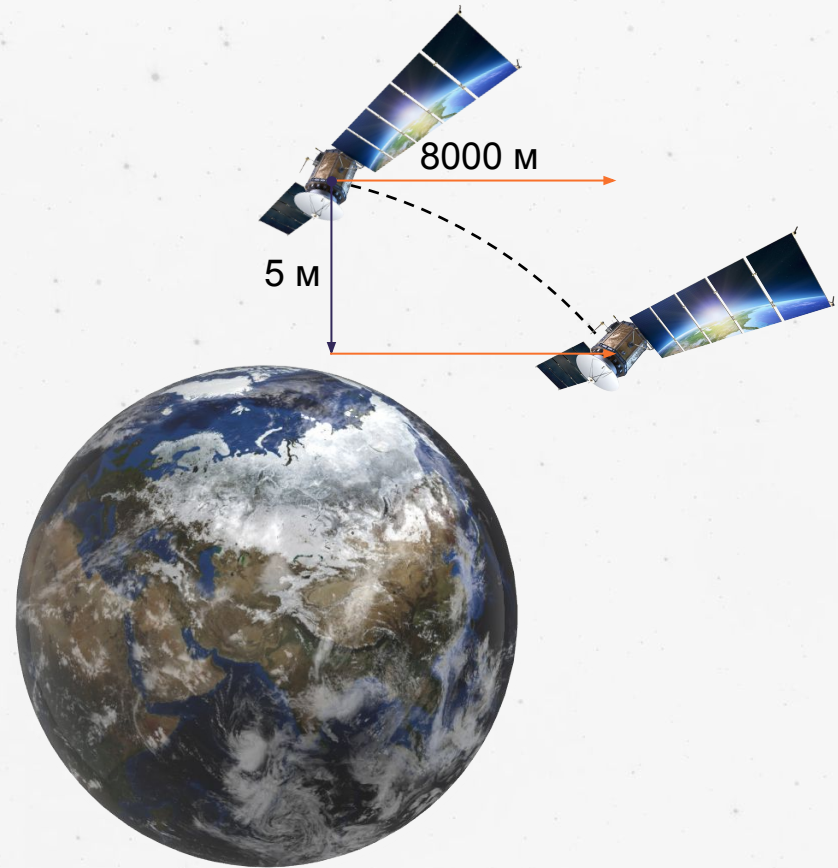


Движение ИСЗ и КА

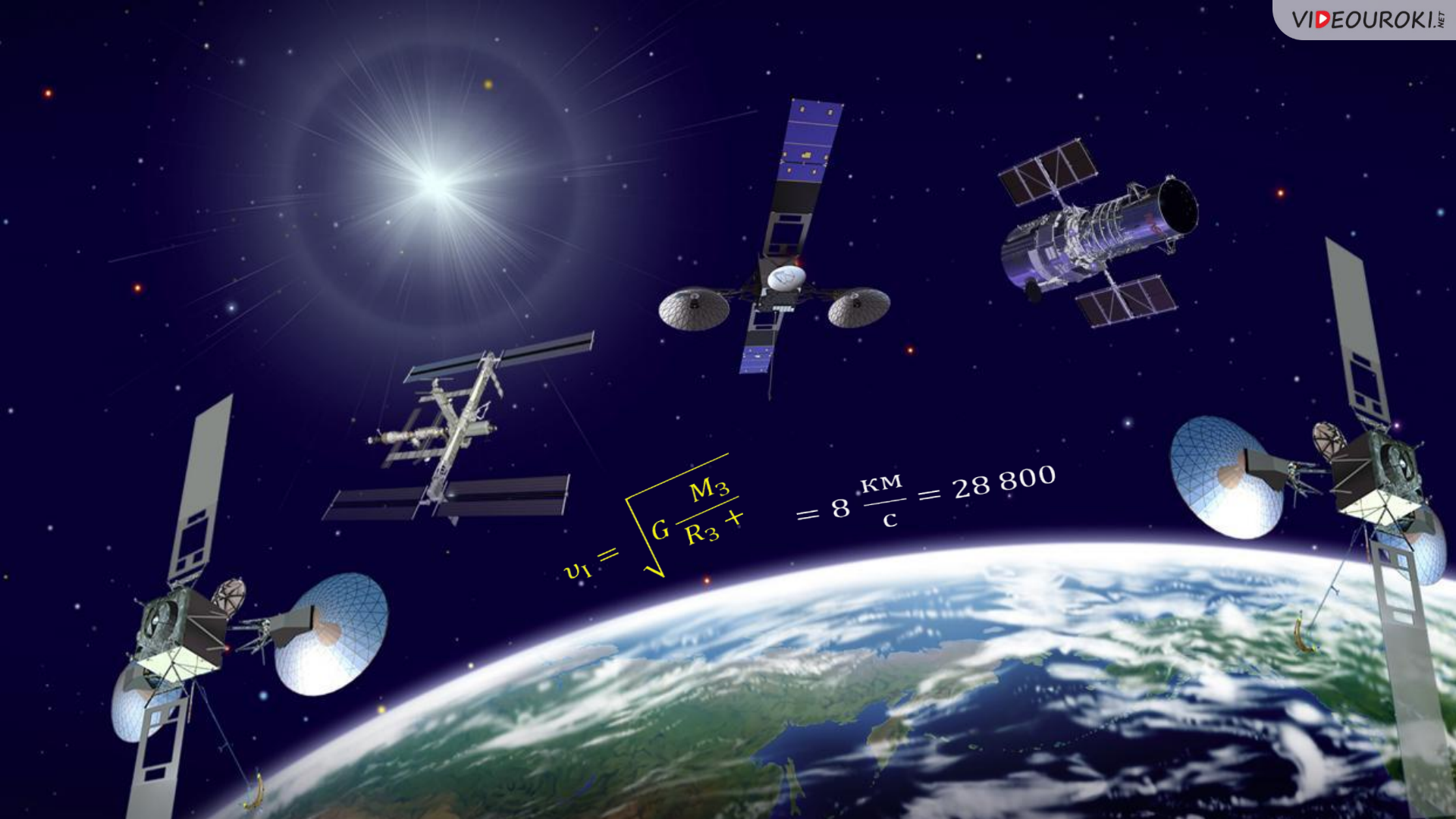
Пусть $g_0 = 10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$, $v_I = 8000 \frac{\text{М}}{\text{с}}$.

Тогда $h = \frac{g_0 t^2}{2} = \frac{10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot (1 \text{ с})^2}{2} = 5 \text{ м};$

$s = v_I t = 8000 \frac{\text{М}}{\text{с}} \cdot 1 \text{ с} = 8000 \text{ м}.$



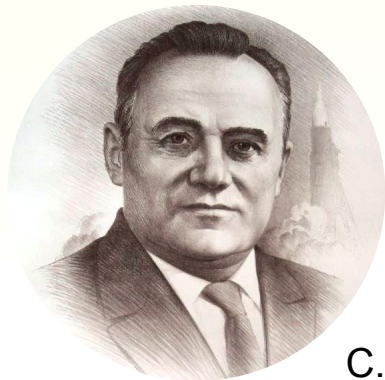




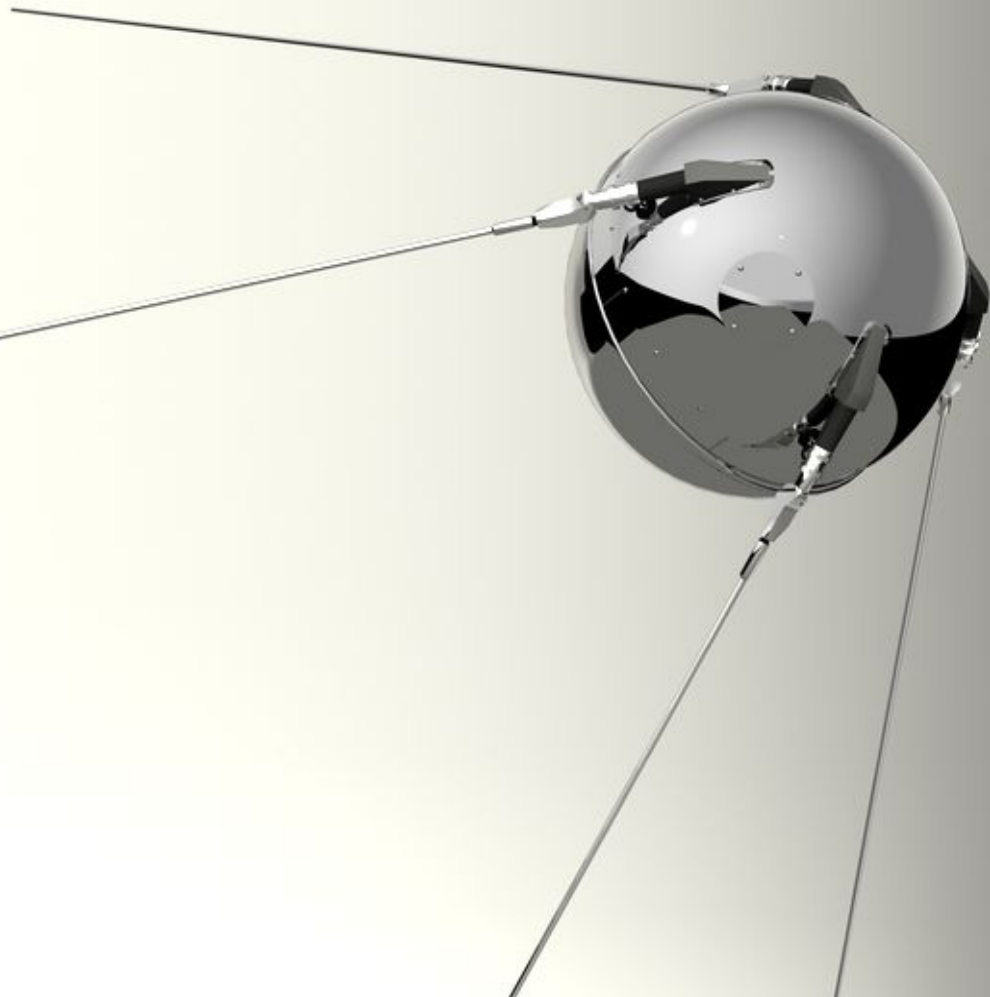
$$v_1 = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3 +}} = 8 \frac{\text{KM}}{\text{c}} = 28\,800$$

Движение ИСЗ и КА

Спутник-1 —
первый искусственный спутник
Земли, советский космический
аппарат, запущенный на орбиту
4 октября 1957 года.



С. П. Королёв

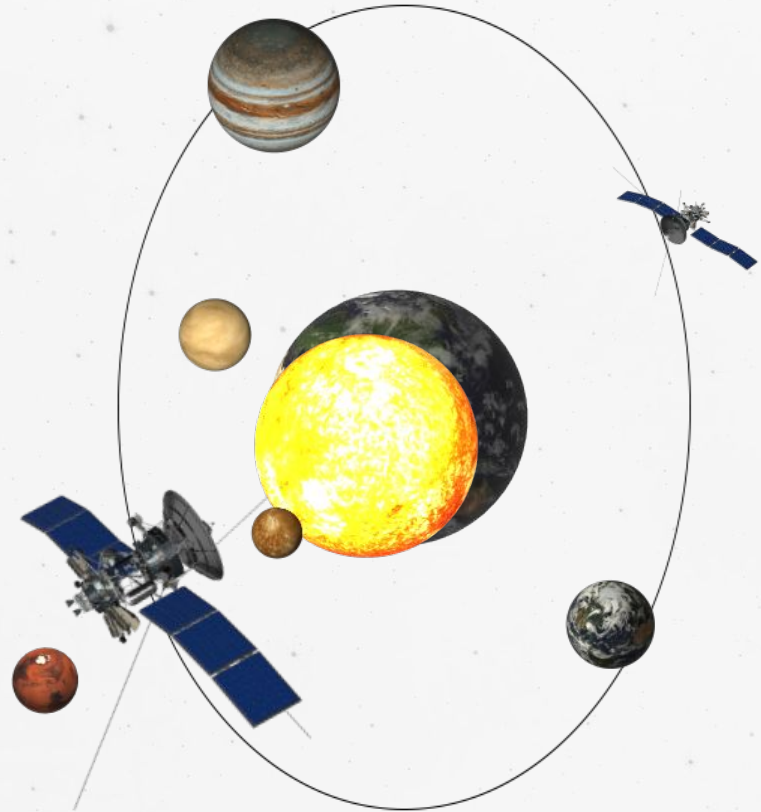




Движение ИСЗ и КА

Скорость, при достижении которой космический аппарат, запускаемый с Земли, может преодолеть земное притяжение и осуществить полёт к другим планетам Солнечной системы, называется второй космической скоростью.

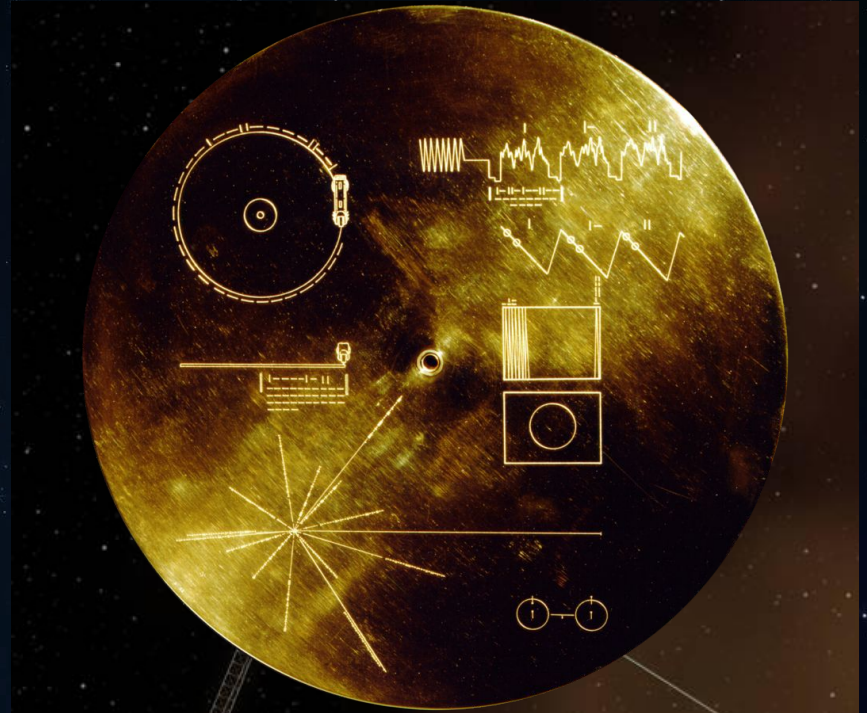
$$v_{II} = \sqrt{2gR} = v_I\sqrt{2} \cong 11,2 \text{ км/с.}$$



Движение ИСЗ и КА

Третья космическая скорость — минимальная скорость, которую необходимо придать находящемуся вблизи поверхности Земли телу, чтобы оно могло преодолеть гравитационное притяжение Земли и Солнца и покинуть пределы Солнечной системы.

$$v_{III} \cong \sqrt{(\sqrt{2} - 1)^2 v^2 + v_{II}^2}.$$



Послание на КА «Вояджер-1»

Движение ИСЗ и КА

Третья космическая скорость:

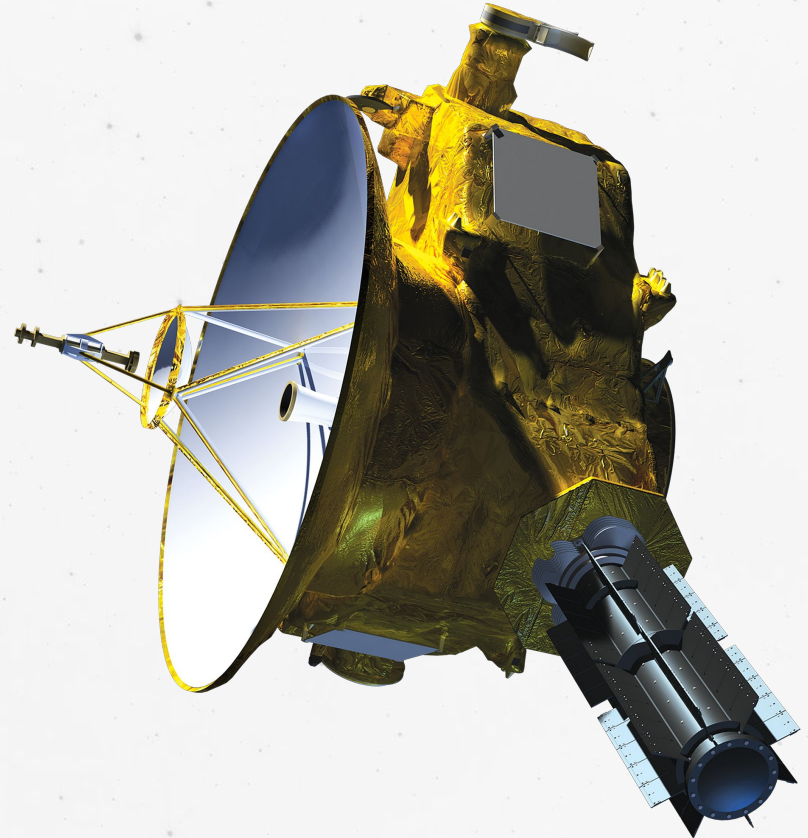
$$v_{III} \cong \sqrt{(\sqrt{2} - 1)^2 v^2 + v_{II}^2}.$$

Орбитальная скорость Земли:

$$v \cong 29,8 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

Третья космическая скорость для Земли:

$$v_{III} \cong \sqrt{(\sqrt{2} - 1)^2 \cdot 29,8^2 + 11,2^2} \cong 16,7 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$



Движение ИСЗ и КА

Первая космическая скорость:

$$v_I = \sqrt{G \frac{M}{R+h}}$$

Вторая космическая скорость:

$$v_{II} = \sqrt{2gR} = v_I \sqrt{2}.$$

Третья космическая скорость:

$$v_{III} \cong \sqrt{(\sqrt{2} - 1)^2 v^2 + v_{II}^2}.$$



Задача 1. Определите первую и вторую космические скорости для Луны.

ДАНО

$$M_{\text{Л}} = 7,35 \cdot 10^{22} \text{ кг}$$

$$R_{\text{Л}} = 1,74 \cdot 10^6 \text{ м}$$

$$v_{\text{IЛ}} = ?$$

$$v_{\text{IIЛ}} = ?$$

РЕШЕНИЕ

Первая космическая скорость:
$$v_{\text{I}} = \sqrt{G \frac{M_{\text{Л}}}{R_{\text{Л}}}}$$

$$v_{\text{IЛ}} = \sqrt{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2} \cdot \frac{7,35 \cdot 10^{22} \text{ кг}}{1,74 \cdot 10^6 \text{ м}}} \cong 1679 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Вторая космическая скорость:
$$v_{\text{IIЛ}} = v_{\text{IЛ}} \sqrt{2}$$

$$v_{\text{IIЛ}} = 1679 \cdot \sqrt{2} \cong 2374 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

ОТВЕТ: $v_{\text{IЛ}} = 1679 \text{ м/с}$; $v_{\text{IIЛ}} = 2374 \text{ м/с}$.

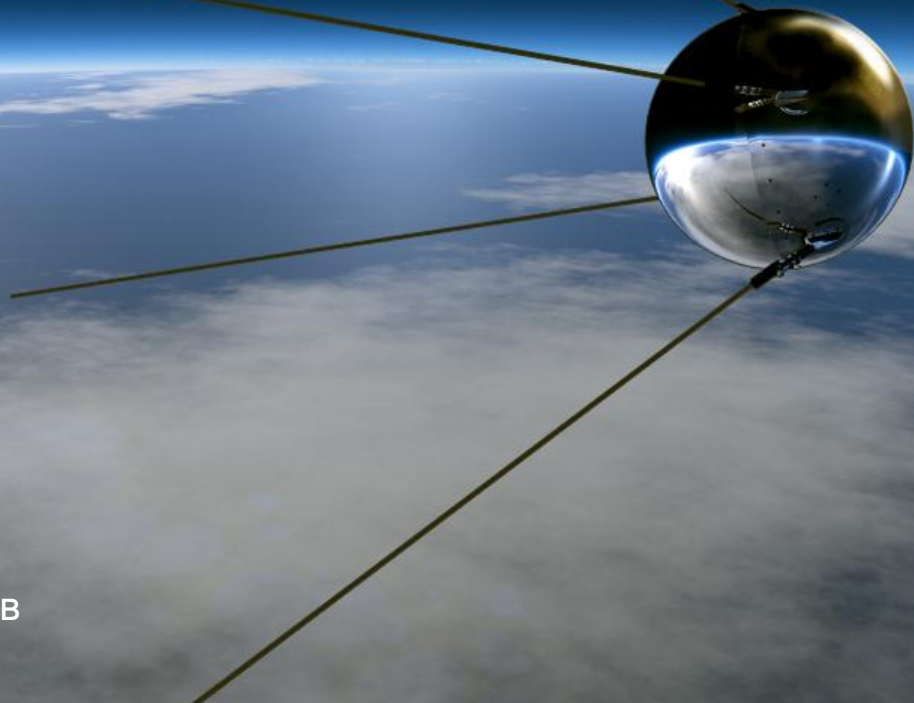


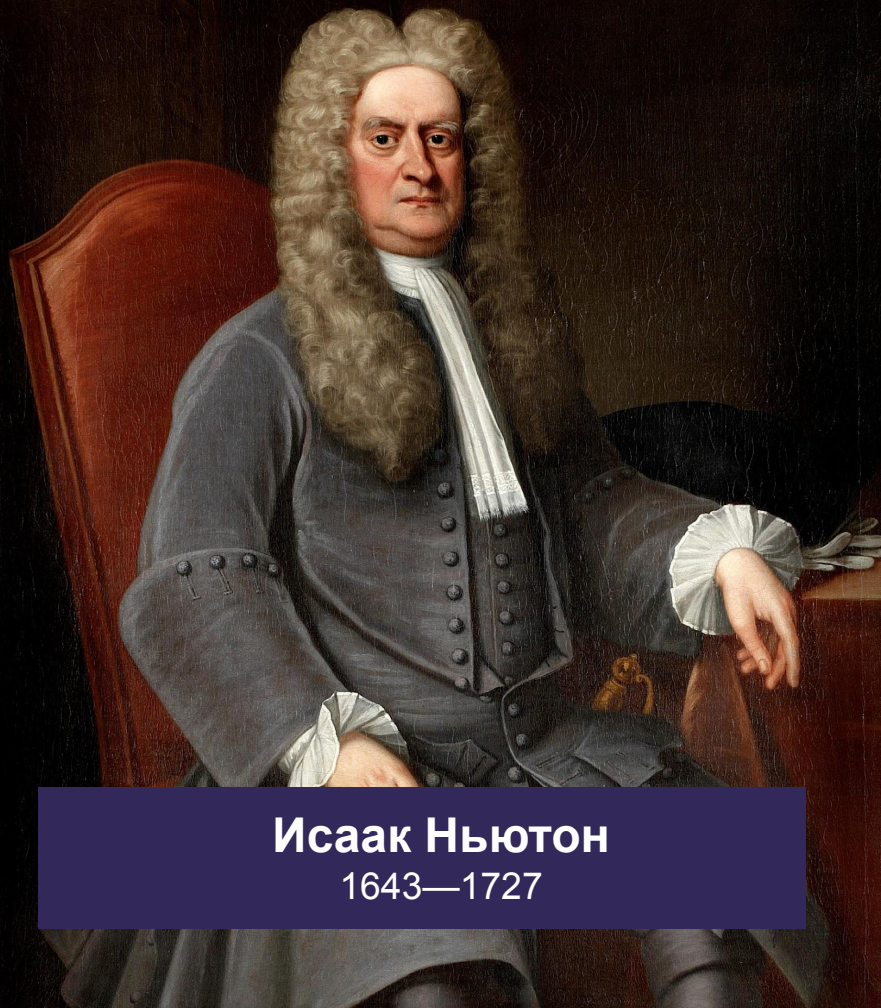
Движение ИСЗ и КА

Спутник-1 —
первый искусственный спутник
Земли, запущенный на орбиту
4 октября 1957 года.

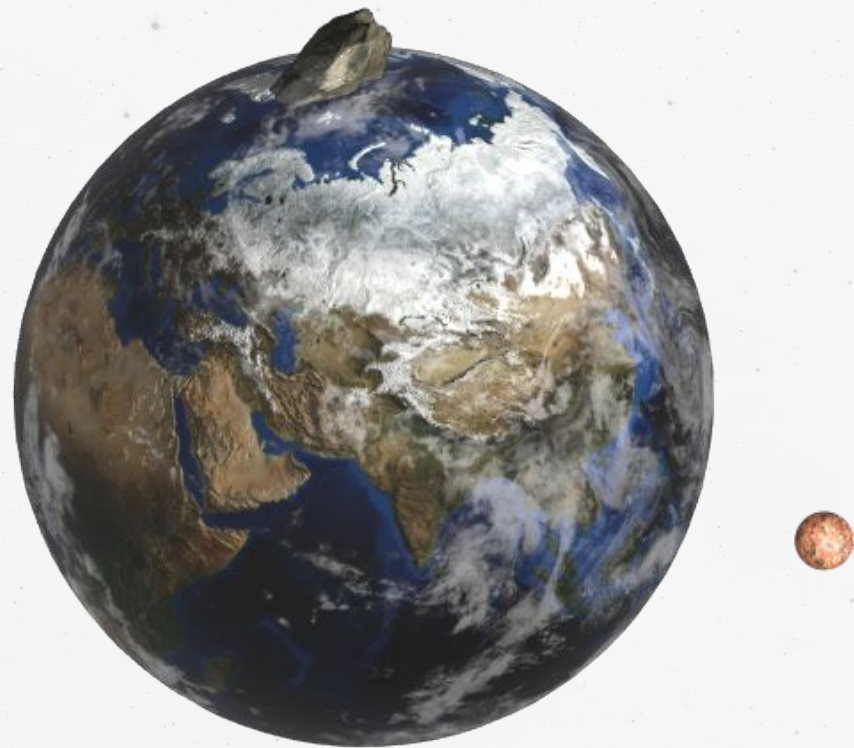


С. П. Королёв

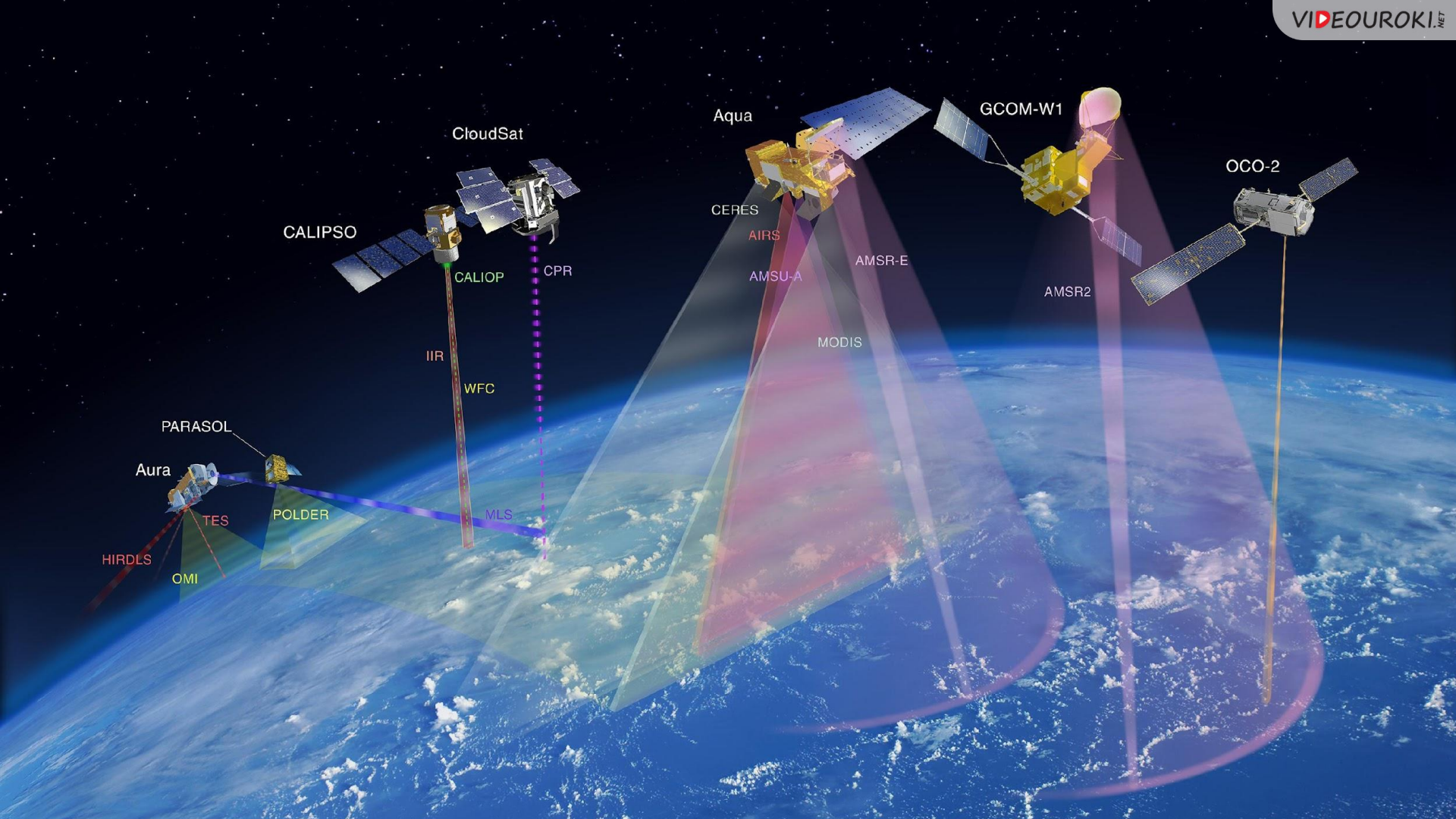


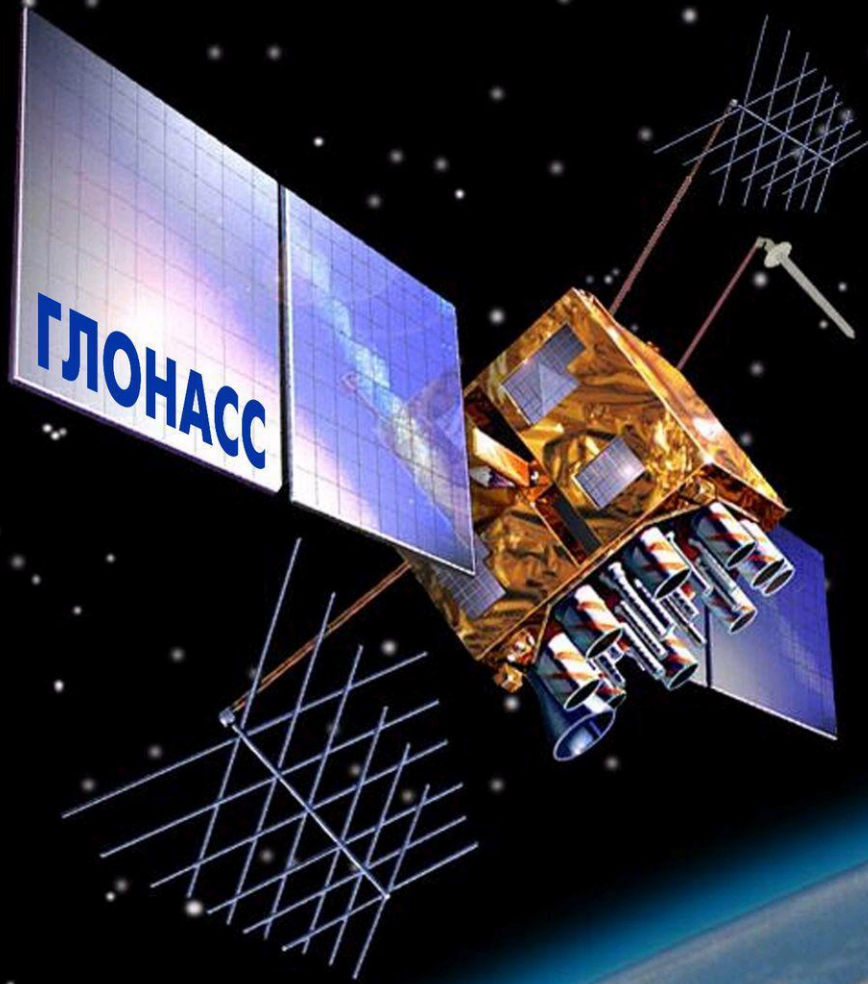


Исаак Ньютон
1643—1727











LISBON

DUBLIN

LONDON

OSLO

STOCKHOLM

МУРМАНСК

АНАДЫРЬ

MADRID

PARIS

AMS

COPENHAGEN

HELSINKI

ТАЛЛИН

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

МАГАДАН

BERN

PRAGA

ВАРШАВА

КАЛИНИНГРАД

РИГА

ПСКОВ

НОРИЛЬСК

ЯКУТСК

ПЕТРОПАВЛОВСКО-КАМЧАТСКИЙ

MONACO

WIEN

БУДАПЕСТ

МИНСК

НОВГОРОД

ТВЕРЬ

МОСКВА

ХАНТЫ-МАНСЙСКИЙ

СУРГУТ

ЮЖНО-САХАЛИНСКИЙ

ROME

ZAGREB

WARSAWA

КАЛИНИНГРАД

РИГА

ПСКОВ

НОРИЛЬСК

ЯКУТСК

ПЕТРОПАВЛОВСКО-КАМЧАТСКИЙ

SARAJEVO

БЕОГРАД

СОФИЯ

БУКУРЕСТИ

ЛИПЕЦК

ВОРОНЕЖ

НИЖНИЙ-НОВГОРОД

КАЗАНЬ

ИЖЕВСК

ПЕРМЬ

ТЮМЕНЬ

ЕКАТЕРИНБУРГ

САРГАТОВ

САМАРА

ATHINA

ANKARA

МАЙКОП

КРАСНОДАР

СТАВРОПОЛЬ

ЧЕРКЕССК

ВОЛГОГРАД

ОРЕНБУРГ

ЧЕЛЯБИНСК

ОМСК

ТОМСК

КЕМЕРОВО

КРАСНОЯРСКИЙ

ХАБАРОВСКИЙ

ATMENA

ANKARA

МАЙКОП

КРАСНОДАР

СТАВРОПОЛЬ

ЧЕРКЕССК

ВОЛГОГРАД

ОРЕНБУРГ

ЧЕЛЯБИНСК

ОМСК

ТОМСК

КЕМЕРОВО

КРАСНОЯРСКИЙ

ХАБАРОВСКИЙ

ATMENA

ANKARA

МАЙКОП

КРАСНОДАР

СТАВРОПОЛЬ

ЧЕРКЕССК

ВОЛГОГРАД

ОРЕНБУРГ

ЧЕЛЯБИНСК

ОМСК

ТОМСК

КЕМЕРОВО

КРАСНОЯРСКИЙ

ХАБАРОВСКИЙ

ATMENA

ANKARA

МАЙКОП

КРАСНОДАР

СТАВРОПОЛЬ

ЧЕРКЕССК

ВОЛГОГРАД

ОРЕНБУРГ

ЧЕЛЯБИНСК

ОМСК

ТОМСК

КЕМЕРОВО

КРАСНОЯРСКИЙ

ХАБАРОВСКИЙ

ATMENA

ANKARA

МАЙКОП

КРАСНОДАР

СТАВРОПОЛЬ

ЧЕРКЕССК

ВОЛГОГРАД

ОРЕНБУРГ

ЧЕЛЯБИНСК

ОМСК

ТОМСК

КЕМЕРОВО

КРАСНОЯРСКИЙ

ХАБАРОВСКИЙ

ATMENA

ANKARA

МАЙКОП

КРАСНОДАР

СТАВРОПОЛЬ

ЧЕРКЕССК

ВОЛГОГРАД

ОРЕНБУРГ

ЧЕЛЯБИНСК

ОМСК

ТОМСК

КЕМЕРОВО

КРАСНОЯРСКИЙ

ХАБАРОВСКИЙ

ATMENA

ANKARA

МАЙКОП

КРАСНОДАР

СТАВРОПОЛЬ

ЧЕРКЕССК

ВОЛГОГРАД

ОРЕНБУРГ

ЧЕЛЯБИНСК

ОМСК

ТОМСК

КЕМЕРОВО

КРАСНОЯРСКИЙ

ХАБАРОВСКИЙ

ATMENA

ANKARA

МАЙКОП

КРАСНОДАР

СТАВРОПОЛЬ

ЧЕРКЕССК

ВОЛГОГРАД

ОРЕНБУРГ

ЧЕЛЯБИНСК

ОМСК

ТОМСК

КЕМЕРОВО

КРАСНОЯРСКИЙ

ХАБАРОВСКИЙ

ATMENA

ANKARA

МАЙКОП

КРАСНОДАР

СТАВРОПОЛЬ

ЧЕРКЕССК

ВОЛГОГРАД

ОРЕНБУРГ

ЧЕЛЯБИНСК

ОМСК

ТОМСК

КЕМЕРОВО

КРАСНОЯРСКИЙ

ХАБАРОВСКИЙ

ATMENA

ANKARA

МАЙКОП

КРАСНОДАР

СТАВРОПОЛЬ

ЧЕРКЕССК

ВОЛГОГРАД

ОРЕНБУРГ

ЧЕЛЯБИНСК

ОМСК

ТОМСК

КЕМЕРОВО

КРАСНОЯРСКИЙ

ХАБАРОВСКИЙ

ATMENA

ANKARA

МАЙКОП

КРАСНОДАР

СТАВРОПОЛЬ

ЧЕРКЕССК

ВОЛГОГРАД

ОРЕНБУРГ

ЧЕЛЯБИНСК

ОМСК

ТОМСК

КЕМЕРОВО

КРАСНОЯРСКИЙ

ХАБАРОВСКИЙ

ATMENA

ANKARA

МАЙКОП

КРАСНОДАР

СТАВРОПОЛЬ

ЧЕРКЕССК

ВОЛГОГРАД

ОРЕНБУРГ

ЧЕЛЯБИНСК

ОМСК

ТОМСК

КЕМЕРОВО

КРАСНОЯРСКИЙ

ХАБАРОВСКИЙ

ATMENA

ANKARA

МАЙКОП

КРАСНОДАР

СТАВРОПОЛЬ

ЧЕРКЕССК

ВОЛГОГРАД

ОРЕНБУРГ

ЧЕЛЯБИНСК

ОМСК

ТОМСК

КЕМЕРОВО

КРАСНОЯРСКИЙ

ХАБАРОВСКИЙ

ATMENA

ANKARA

МАЙКОП

КРАСНОДАР

СТАВРОПОЛЬ

ЧЕРКЕССК

ВОЛГОГРАД

ОРЕНБУРГ

ЧЕЛЯБИНСК

ОМСК

ТОМСК

КЕМЕРОВО

КРАСНОЯРСКИЙ

ХАБАРОВСКИЙ

ATMENA

ANKARA

МАЙКОП

КРАСНОДАР

СТАВРОПОЛЬ

ЧЕРКЕССК

ВОЛГОГРАД

ОРЕНБУРГ

ЧЕЛЯБИНСК

ОМСК

ТОМСК

КЕМЕРОВО

КРАСНОЯРСКИЙ

ХАБАРОВСКИЙ

ATMENA

ANKARA

МАЙКОП

КРАСНОДАР

СТАВРОПОЛЬ

ЧЕРКЕССК

ВОЛГОГРАД

ОРЕНБУРГ

ЧЕЛЯБИНСК

ОМСК

ТОМСК

КЕМЕРОВО

КРАСНОЯРСКИЙ

ХАБАРОВСКИЙ

ATMENA

ANKARA

МАЙКОП

КРАСНОДАР

СТАВРОПОЛЬ

ЧЕРКЕССК

ВОЛГОГРАД

ОРЕНБУРГ

ЧЕЛЯБИНСК

ОМСК

ТОМСК

КЕМЕРОВО

КРАСНОЯРСКИЙ

ХАБАРОВСКИЙ

ATMENA

ANKARA

МАЙКОП

КРАСНОДАР

СТАВРОПОЛЬ

ЧЕРКЕССК

ВОЛГОГРАД

ОРЕНБУРГ

ЧЕЛЯБИНСК

ОМСК

ТОМСК

КЕМЕРОВО

КРАСНОЯРСКИЙ

ХАБАРОВСКИЙ

ATMENA

ANKARA

МАЙКОП

КРАСНОДАР

СТАВРОПОЛЬ

ЧЕРКЕССК

ВОЛГОГРАД

ОРЕНБУРГ

ЧЕЛЯБИНСК

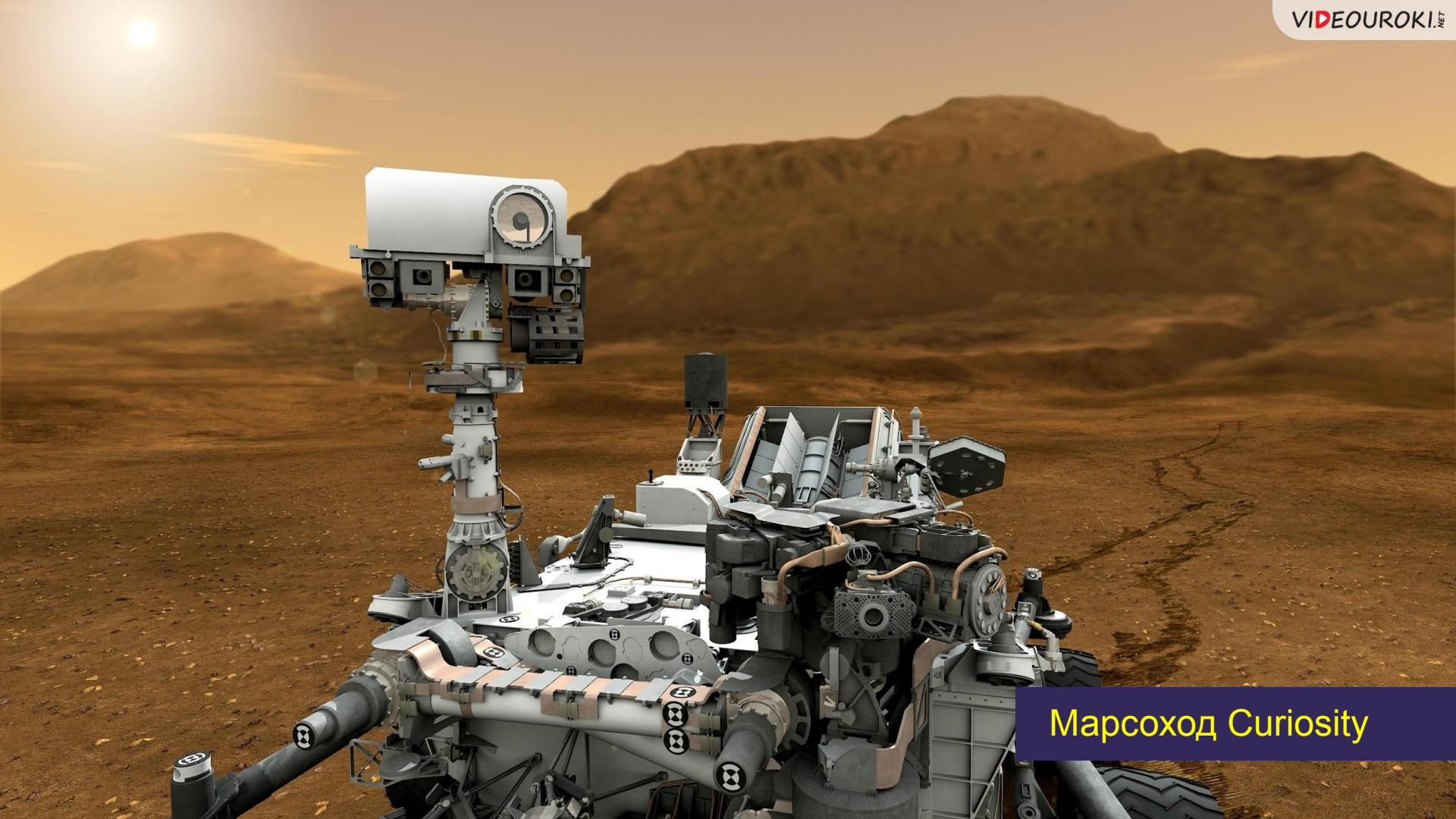
ОМСК

ТОМСК

КЕМЕРОВО

КРАСНОЯРСКИЙ

ХАБАРОВСКИЙ



Марсоход Curiosity

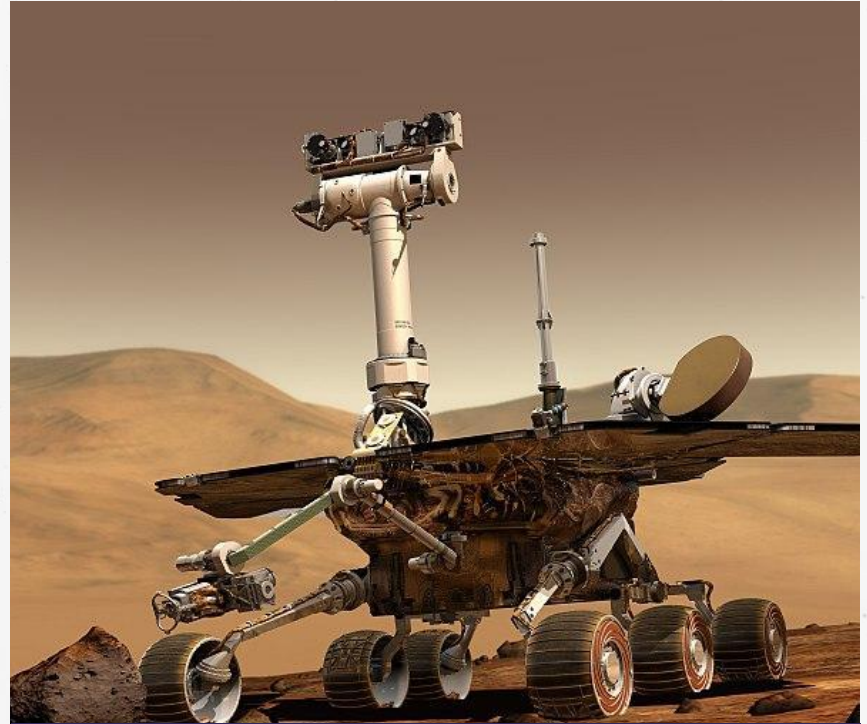


Траектория полёта на Луну

Движение ИСЗ и КА

Необходимые условия для запуска космического аппарата:

- 1) геоцентрическая скорость КА должна превышать 2-ю космическую скорость;
- 2) гелиоцентрическая орбита аппарата должна пересекаться с орбитой данной планеты;
- 3) орбита КА должна быть наиболее оптимальной с точки зрения сроков полёта, затрат топлива и т. д.

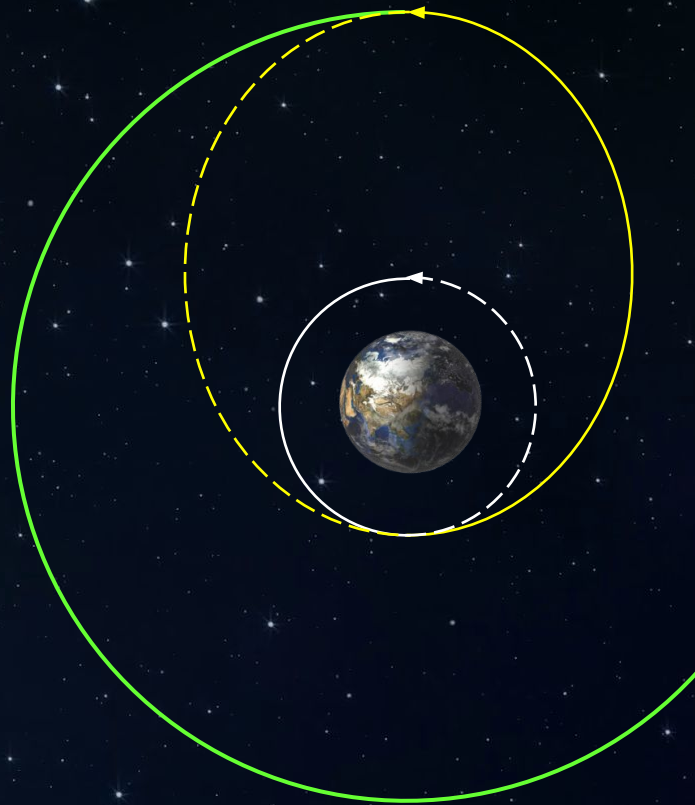


Марсоход «Спирит»

Движение ИСЗ и КА

Энергетически оптимальные орбиты

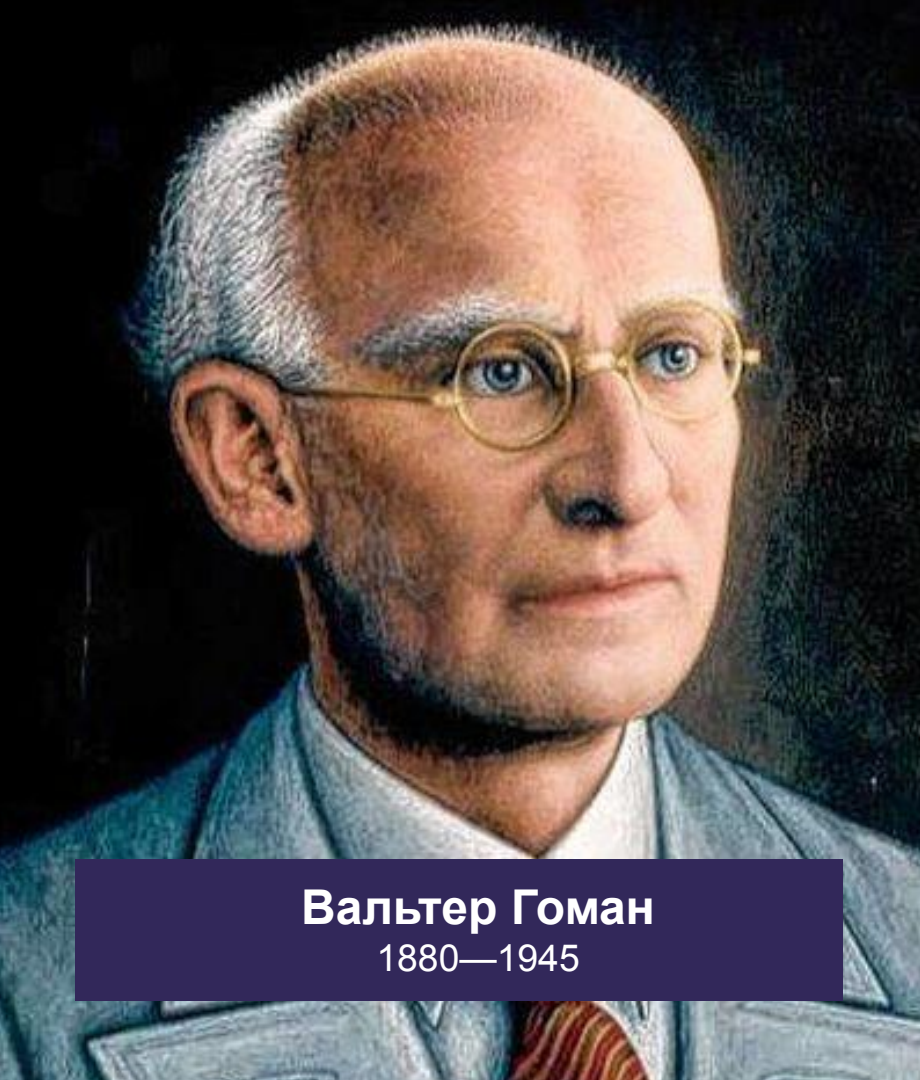
орбиты, которые соответствуют наименьшей геоцентрической скорости космических аппаратов в момент достижения границы сферы действия Земли.



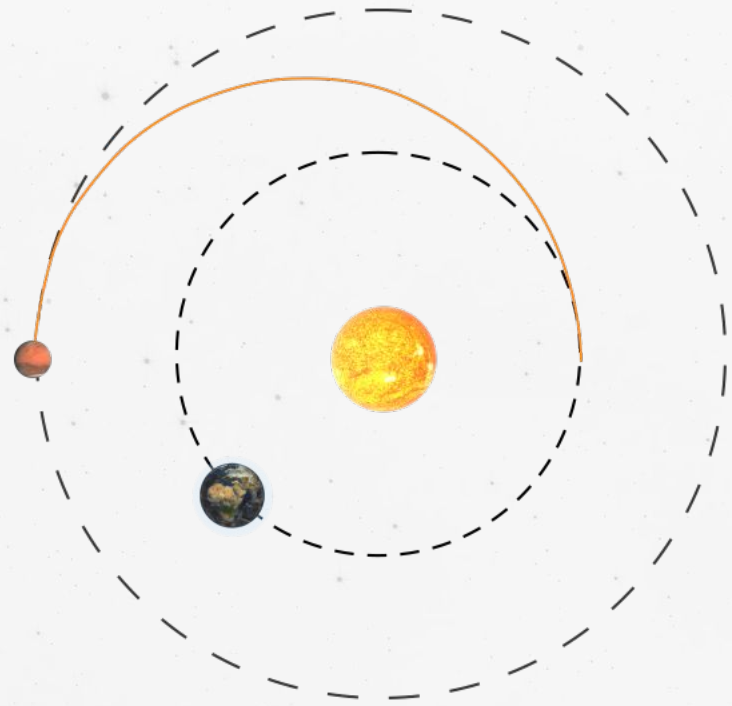
Движение ИСЗ и КА

Энергетически оптимальные орбиты— орбиты, которые соответствуют наименьшей геоцентрической скорости космических аппаратов в момент достижения границы сферы действия Земли.





Вальтер Гоман
1880—1945



**Полуэллиптическая (гомановская)
орбита**

Задача 2. Определите среднее время полёта на Марс, если его большая полуось равна 1,52 а. е.

ДАНО

$$a_{\sigma} = 1,52 \text{ а. е.}$$

$$a_{\oplus} = 1 \text{ а. е.}$$

$$T_{\oplus} = 1 \text{ год}$$

$$t = ?$$

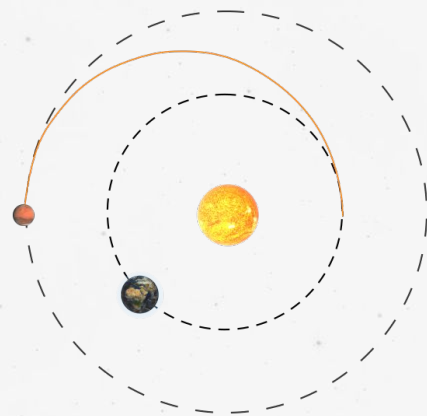
РЕШЕНИЕ

Третий закон Кеплера: $\frac{T^2}{T_{\oplus}^2} = \frac{a^3}{a_{\oplus}^3} \Rightarrow T^2 = \left(\frac{a_{\oplus} + a_{\sigma}}{2}\right)^3 \Rightarrow T = \sqrt{\left(\frac{a_{\oplus} + a_{\sigma}}{2}\right)^3}$.

Большая полуось спутника: $a = \frac{a_{\oplus} + a_{\sigma}}{2}$.

Время полёта на Марс: $t = \frac{T}{2} = \frac{a_{\oplus} + a_{\sigma}}{4} \sqrt{\frac{a_{\oplus} + a_{\sigma}}{2}}$.

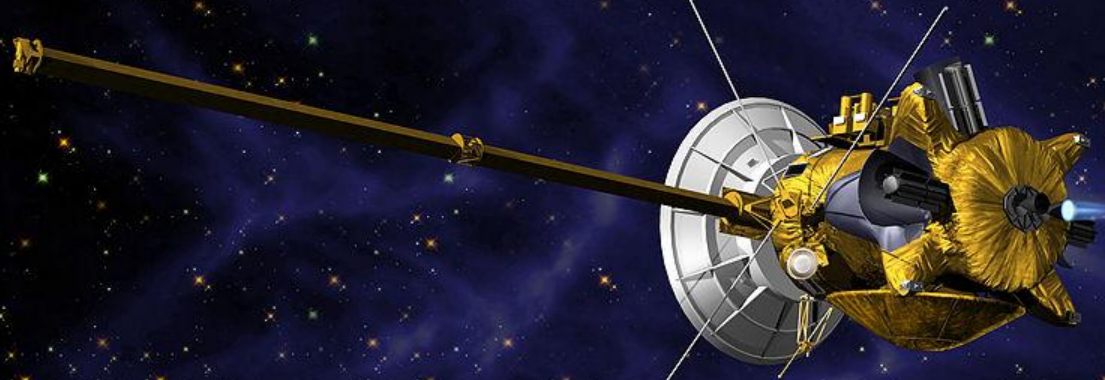
$$t = \frac{1 + 1,52}{4} \sqrt{\frac{1 + 1,52}{2}} \cong 0,71 \text{ года} \cong 259 \text{ сут.}$$



ОТВЕТ: среднее время полёта на Марс составит 259 суток.



Космический корабль «Союз»



Космический аппарат
«Кассини-Гюйгенс»

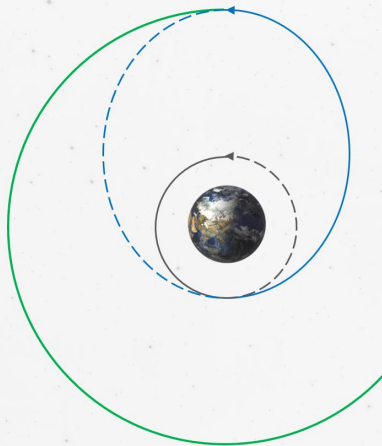
Первые фотографии поверхности
Венеры, сделанные космическим
аппаратом «Венера-7»



Выводы

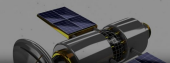
Движение ИСЗ и КА

Энергетически оптимальные орбиты — орбиты, которые соответствуют наименьшей геоцентрической скорости космических аппаратов в момент достижения границы сферы действия Земли.



Движение ИСЗ и КА

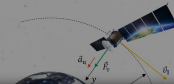
Искусственные спутники планет — космические аппараты, созданные людьми, которые позволяют наблюдать за планетной окрестностью.



Движение ИСЗ и КА

Первая космическая скорость:

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}} \text{ км/с}$$



Движение ИСЗ и КА

Скорость, при достижении которой космический аппарат, запускаемый с Земли, может преодолеть земное притяжение и осуществить полёт к планетам.



Движение ИСЗ и КА

Третья космическая скорость:

$$v_{III} \approx \sqrt{(v_2 - v_1)^2 + v_{II}^2}$$

Орбитальная скорость Земли:



Движение ИСЗ и КА

Необходимые условия для запуска космического аппарата:

- 1) геоцентрическая скорость КА должна превышать 2-ю космическую скорость;



Движение ИСЗ и КА

Энергетически оптимальные орбиты — орбиты, которые соответствуют наименьшей геоцентрической скорости космических аппаратов в момент достижения границы сферы действия Земли.

