

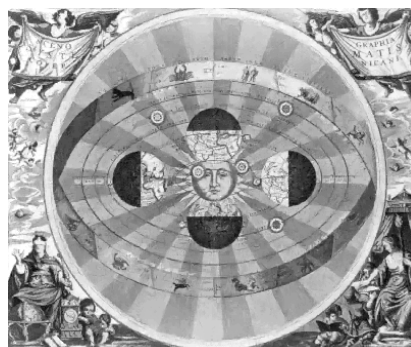
# Земля – планета Солнечной системы

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ</i> .....	1
<i>ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА ДЛЯ ПЛАНЕТНЫХ ДВИЖЕНИЙ</i> .....	1
<i>НЬЮТОНОВСКАЯ МЕХАНИКА И ВСЕМИРНОЕ ТЯГОТЕНИЕ</i> .....	2
<i>ПРИБЛИЖЕННЫЙ ХАРАКТЕР ЗАКОНОВ КЕПЛЕРА</i> .....	3
<i>ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ НЬЮТОНОВСКОЙ МЕХАНИКИ И РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ТЕОРИЯ ТЯГОТЕНИЯ</i> .....	3
<i>ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНЕТ</i> .....	4
<i>ПЛАНЕТА ЗЕМЛЯ</i> .....	7
<i>ВОПРОСЫ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗМЫШЛЕНИЯ</i> .....	9

## **СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ**

Современные представления о месте Земли во Вселенной берут свое начало в 16 столетии, когда польский астроном Николай Коперник предложил модель нашей планетной системы, в центре которой находилось Солнце. Теперь общеизвестно, что наша планетная система образована Солнцем – звездой нашей Галактики (Млечного Пути) и многочисленными небесными телами, которые обращаются вокруг Солнца: это 9 больших планет, по меньшей мере 60 спутников планет, несметное число астероидов и комет, и обширная межпланетная среда. В этой модели Земля занимает рядовое место среди других планет, находясь на третьей по счету орбите, считая от Солнца. Наиболее значительная отличительная черта нашей планеты состоит в том, что малая окрестность ее поверхности – это единственное место во Вселенной, где, насколько нам известно, существует жизнь.



### **Николай Коперник и его модель Солнечной системы.**

В историческом плане изучение планетных движений сыграло центральную роль в становлении наших знаний об основах небесной механики и физики в целом. Ранние астрономические теории базировались на старых представлениях Птолемея об иерархии круговых орбит и равномерных движениях планет по этим орбитам. Знаменитая работа Коперника «Об обращении небесных сфер» (увидевшая свет в 1543 году) положила начало научной революции, с которой едва ли может сравниться по своим последствиям какое-либо интеллектуальное событие во всей истории человечества.

## **ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА ДЛЯ ПЛАНЕТНЫХ ДВИЖЕНИЙ**

В начале 17 столетия немецкий ученый Иоганн Кеплер эмпирическим путем открыл кинематические закономерности планетных движений. Он воспользовался превосходными для того времени таблицами положений планет, составленными Тихо Браге в результате многолетних астрономических наблюдений, выполненных невооруженным глазом, без телескопов. В результате трудоемкого тщательного анализа этих данных Кеплер вывел эмпирические законы движений планет, проложив таким образом путь к современной гравитационной теории Солнечной системы.

## Земля – планета Солнечной системы



Тихо Браге



Иоганн Кеплер

Три закона Кеплера для движений планет можно сформулировать следующим образом:

1. Все планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых находится Солнце.
2. Радиус-вектор, проведенный из Солнца к планете, описывает равные площади за равные промежутки времени.
3. Квадраты периодов обращения планет пропорциональны кубам больших полуосей их эллиптических орбит.

### **НЬЮТОНОВСКАЯ МЕХАНИКА И ВСЕМИРНОЕ ТЯГОТЕНИЕ**

Динамическое объяснение наблюдаемых закономерностей планетных движений на основе физических законов, управляющих этими движениями, было найдено Исааком Ньютоном в конце 17 столетия. Ньютон заложил основы новой механики (теперь мы называем ее классической механикой) и открыл закон всемирного тяготения (1687 г.). В сущности **ньютоновская механика** была новой физической теорией, которая в равной мере описывала движения как небесных, так и земных тел. Основное утверждение классической механики известно как **второй закон Ньютона**, согласно которому ускорение тела пропорционально полной силе, приложенной к телу.

Масса Солнца, расположенного в центре системы, составляет более 99% всей массы Солнечной системы. Орбитальное движение любой из планет управляется главным образом силой ее гравитационного притяжения к Солнцу.



Исаак Ньютон

**Гравитация (тяготение)** – это универсальная сила притяжения, действующая между любыми материальными телами. Это наиболее слабое из четырех фундаментальных физических взаимодействий, но в масштабах земных тел, с которыми мы повседневно имеем дело здесь на Земле, а также в масштабах астрономических тел, эта сила оказывается доминирующей. Паде-

## *Земля – планета Солнечной системы*

ние освобожденного на некоторой высоте тела на поверхность Земли и вес тела, находящегося на поверхности Земли – это наиболее знакомые проявления тяготения, но обращение Луны вокруг Земли и Земли вокруг Солнца также обусловлены действием гравитационных сил.

Центральная сила, удерживающая планету на околосолнечной орбите, подчиняется ньютоновскому **закону всемирного тяготения**. Согласно этому закону, любые два тела во Вселенной (точечные массы, или материальные точки), притягивают друг друга с силой, величина которой пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между этими телами. С помощью второго закона Ньютона можно доказать математически, что регулярные движения планет под действием силы притяжения к Солнцу, обратно пропорциональной квадрату расстояния до него, описываются законами Кеплера. Все планеты (и астероиды) под действием этой силы движутся вокруг Солнца по эллиптическим орбитам. Иными словами, законы Кеплера можно рассматривать как следствие ньютоновских законов движения в центральном поле тяготения, сила которого убывает как  $1/r^2$  при удалении от неподвижного центра, и наоборот, закон всемирного тяготения можно вывести из законов Кеплера, если принять за основу ньютоновские законы движения.

Моделирующие компьютерные программы, в которых даются иллюстрации законов Кеплера, можно рассматривать как экспериментальную проверку этих законов (в вычислительном эксперименте), потому что программы отображают движения планет, ничего «не зная» о законах Кеплера: для расчета траекторий программы используют только второй закон Ньютона и закон всемирного тяготения.

### **ПРИБЛИЖЕННЫЙ ХАРАКТЕР ЗАКОНОВ КЕПЛЕРА**

В действительности законы Кеплера дают лишь некоторое приближенное описание планетных движений, потому что эти законы вытекают из законов Ньютона только для случая, когда движение происходит под действием единственной силы, направленной к неподвижному центру и убывающей обратно пропорционально квадрату расстояния до этого центра. Однако на самом деле Солнце, которое для планеты служит источником такой силы, нельзя считать строго неподвижным, так как оно совершает небольшие ускоренные движения под действием сил притяжения со стороны других планет в соответствии со вторым и третьим законами Ньютона. Более того, планеты притягивают друг друга, и поэтому движение планеты нельзя считать происходящим только под действием притяжения к Солнцу – силы тяготения других планет искажают эллиптическое движение, которое планета совершала бы, если бы она была единственной планетой, обращающейся вокруг одиночной звезды. Поэтому для планет Солнечной системы законы Кеплера приближенны. Гравитационные возмущения со стороны других планет приводят к отклонениям от этих простых законов. Например, компоненты двойной планеты (такой, как Земля вместе с Луной) при обращении вокруг Солнца движутся по очень сложным траекториям.

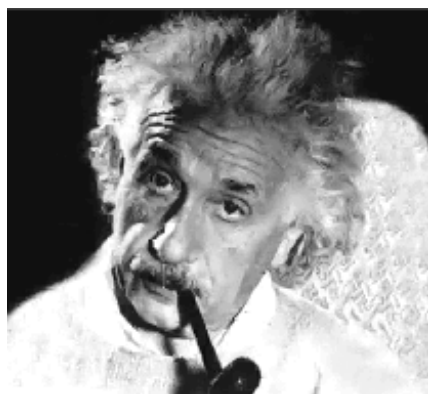
То, что законы Кеплера оказываются столь хорошим приближением к истинным движениям планет, обусловлено исключительно тем, что массы всех планет очень малы по сравнению с массой Солнца. Поэтому удобно рассматривать движение каждой из планет вокруг Солнца как слегка возмущенное эллиптическое движение и считать, что параметры этого эллипса медленно изменяются со временем под действием малых сил тяготения со стороны других планет. Одним из знаменитых достижений небесной механики, полученных применением подобной теории малых возмущений, было **открытие планеты Нептун** на основе наблюдаемых возмущений в движении Урана. Нептун был обнаружен в 1846 году почти точно в том месте, которое было предсказано теоретически. Способность теории давать объяснение наблюдаемым явлениям и предсказывать новые явления получила триумфальное подтверждение. И на протяжении последующих лет наблюдения за движениями планет Солнечной системы давали направление и стимулы для развития небесной механики в частности и классической механики в целом.

### **ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ НЬЮТОНОВСКОЙ МЕХАНИКИ И РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ТЕОРИЯ ТЯГОТЕНИЯ**

Ньютоновские представления о гравитации занимали прочные позиции вплоть до начала 20 столетия, пока лежащая в их основе концепция дальнего действия (действия на расстоянии) была признана несостоятельной с точки зрения теории относительности. Альберт Эйнштейн в

## *Земля – планета Солнечной системы*

созданной им *общей теорией относительности* развил совершенно новые, релятивистские представления о тяготении, согласно которым наличие массивных тел проявляется не в создании некоторого силового поля (ньютоновского поля тяготения), а в искривлении четырехмерного пространственно-временного континуума. В такой четырехмерной вселенной с искривленным пространством-временем мировые линии свободных тел представляют собой геодезические линии (кратчайшие четырехмерные пути между мировыми точками). Эйнштейновский подход к описанию гравитации основан на *принципе эквивалентности*, согласно которому принципиально невозможно на опыте отличить ситуацию, когда некоторое тело находится в равноускоренной системе отсчета в отсутствие гравитационного поля, от ситуации, когда тело находится в неподвижной системе отсчета в однородном гравитационном поле.



Альберт Эйнштейн

На основе релятивистской теории тяготения удалось объяснить некоторые явления, которые не находили объяснения в рамках ньютоновской теории. К числу таких явлений относятся искривление лучей света при прохождении вблизи массивных тел (таких как Солнце), красное смещение спектральной линии излучения источника, находящегося в гравитационном поле, и замедление часов в гравитационном поле. Все эти явления были подтверждены на опыте с точностью, выходящей за пределы ошибок эксперимента. Новая теория смогла также объяснить обнаруженную в астрономических наблюдениях дополнительную прецессию орбиты Меркурия, составляющую 43 угловых секунды в столетие, которая оставалась необъясненной в рамках ньютоновской теории тяготения после того, как были приняты во внимание все возможные возмущения орбиты Меркурия со стороны других планет.

И даже в наши дни ньютоновская теория тяготения обеспечивает достаточную точность почти во всех практических приложениях. Главное значение эйнштейновской теории заключается в радикальном концептуальном пересмотре классической теории и в стимулировании дальнейшего развития физического мировоззрения.

## **ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНЕТ**

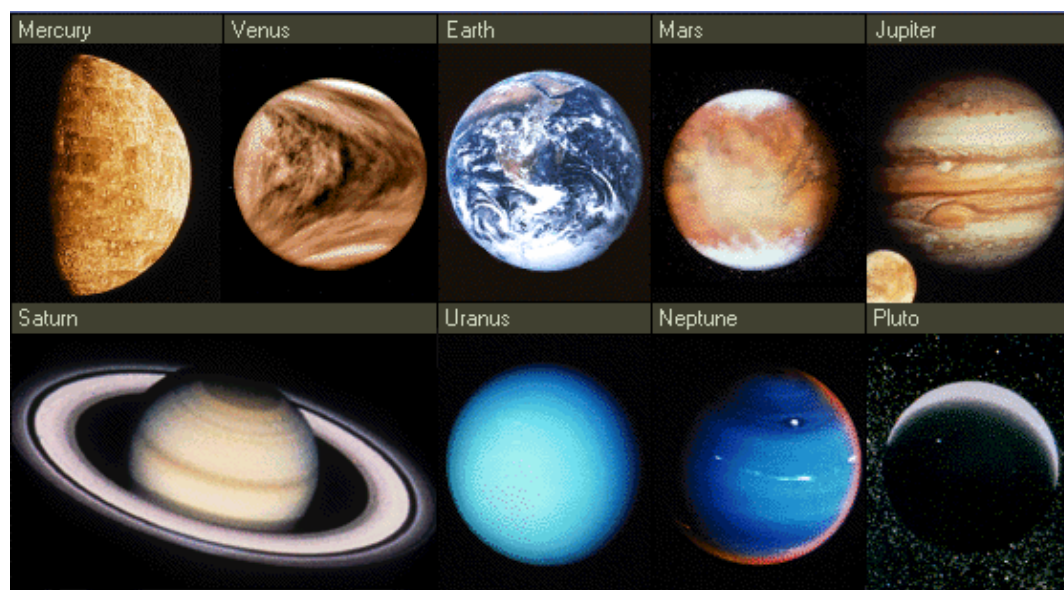
Солнце – это типичная звезда промежуточного размера и яркости. Солнечный свет и невидимое излучение Солнца возникают при преобразовании водорода в гелий в горячих, плотных внутренних областях Солнца. Несмотря на то, что эта ядерная реакция синтеза потребляет 600 миллионов тонн водорода каждую секунду, масса Солнца настолько велика ( $2 \times 10^{30}$  kg), что оно может продолжать сиять с той же яркостью в течение 6 миллиардов лет. Благодаря этой стабильности оказалось возможным развитие и поддержание жизни на Земле.

Несмотря на кажущуюся неизменность солнца, это чрезвычайно активная звезда. На его поверхности появляются и исчезают с 11-летней периодичностью темные пятна, ограниченные интенсивными магнитными полями; внезапные выбросы заряженных частиц от солнечных вспышек могут вызывать на земле северное сияние и создавать помехи радиосвязи; от Солнца исходит также непрерывный поток протонов, электронов и ионов, пронизывающий всю солнечную систему по спиралям из-за осевого вращения Солнца. Этот солнечный ветер формирует

## Земля – планета Солнечной системы

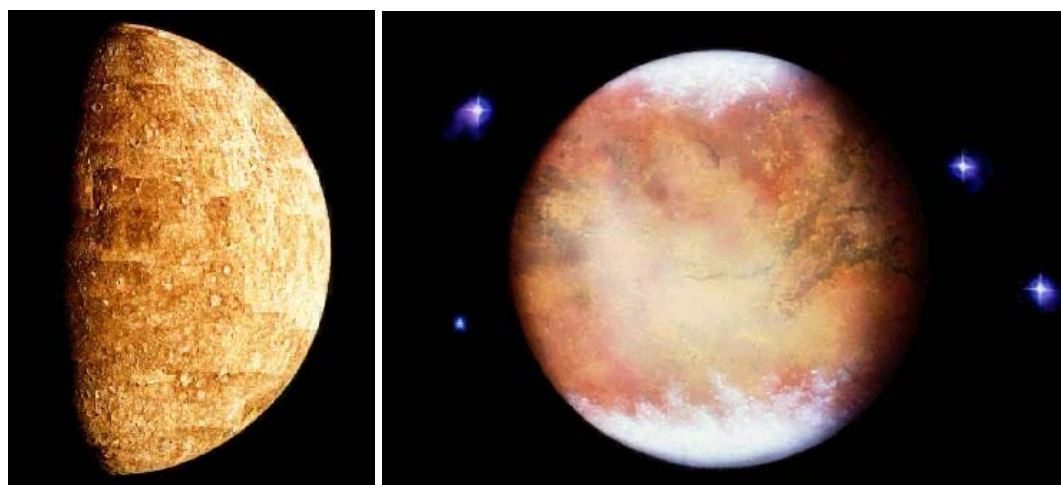
хвосты комет и оставляет свои следы в лунной почве, образцы которой были доставлены с поверхности Луны на Землю экипажем американского космического корабля Аполлон.

На сегодняшний день известны девять больших планет. Обычно их разделяют на две группы: *внутренние планеты* (Меркурий, Венера, Земля и Марс) и *внешние планеты* (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун и Плутон). Внутренние планеты (планеты земной группы) сравнительно невелики и образованы в основном горными породами и железом. Внешние планеты (планеты группы Юпитера или планеты-гиганты) значительно крупнее (за исключением Плутона) и состоят главным образом из водорода, гелия и льда.



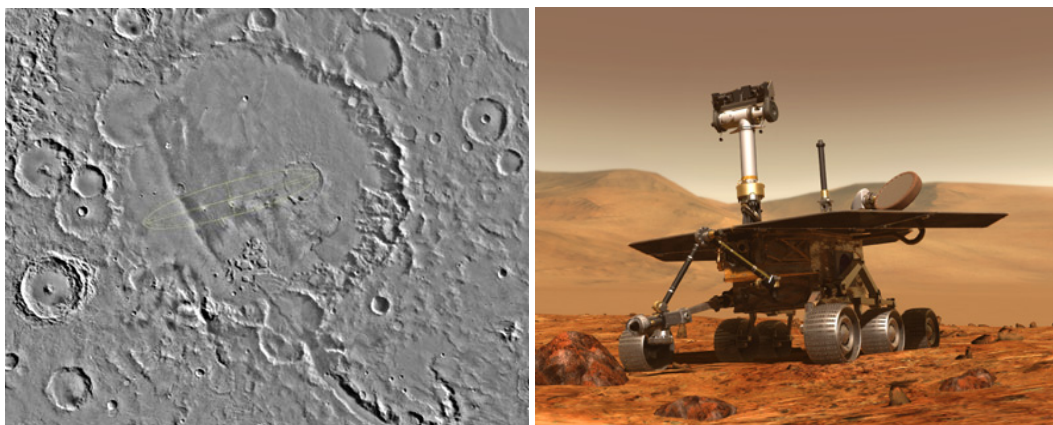
### Планеты Солнечной системы

Плотность Меркурия на удивление велика, видимо потому, что у него необыкновенно большое железное ядро. Из-за практически полного отсутствия атмосферы поверхность Меркурия сохранила до настоящего времени следы бомбардировки метеоритами и астероидами, происходившей в ранний период его истории. Существуют убедительные свидетельства того, что на поверхности Марса когда-то имела вода, но теперь марсианская атмосфера, состоящая из углекислого газа, настолько тонка, что планета является сухой и холодной, с полярными шапками из твердого углекислого газа, т.е. сухого льда.



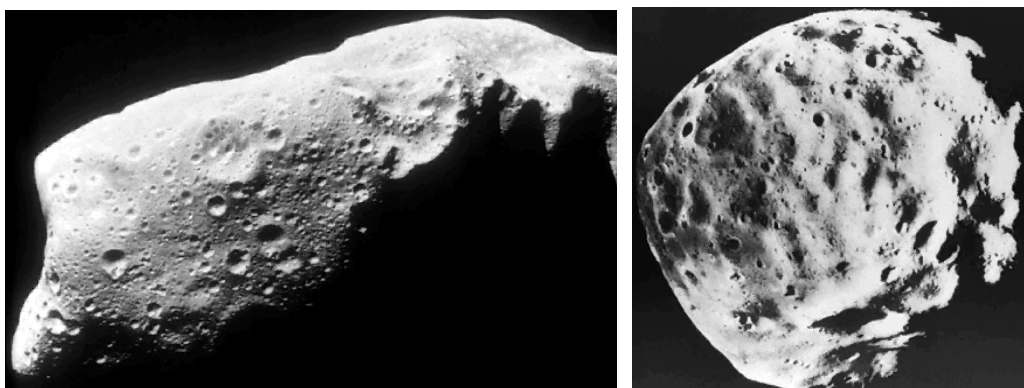
Меркурий и Марс

## *Земля – планета Солнечной системы*



Намеченная площадка для посадки спускаемого аппарата в кратере Гусев (слева) и аппарат Ровер на поверхности Марса (справа).

Поверхности Меркурия, Марса и нескольких спутников планет (в том числе поверхность Луны) сохранили следы интенсивной бомбардировки астероидами и метеоритами, происходившей на ранних стадиях истории Солнечной системы. На Земле такие следы исчезли в результате эрозии, за исключением нескольких недавно обнаруженных кратеров, образовавшихся в результате столкновений с крупными космическими телами.



Астероид 243 Ида (слева) и спутник Марса Фобос (справа)

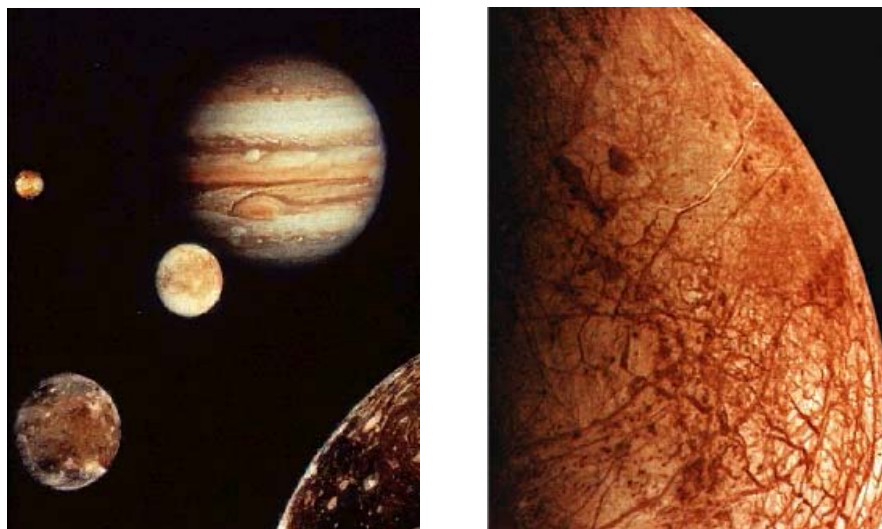
Юпитер – самая большая планета Солнечной системы. В его водородно-гелиевой атмосфере видны облака, окрашенные в пастельные цвета. Гигантская магнитосфера Юпитера, окружающие его кольца и многочисленные естественные спутники по сути дела образуют собственную планетную систему.

Сатурн в этом отношении можно считать соперником Юпитера, так как его окружают кольца более сложной структуры и значительно больших размеров, и у него больше спутников, один из которых (Титан) имеет собственную атмосферу.

В составе Урана и Нептуна значительно меньше водорода по сравнению с Юпитером и Сатурном. Уран, также окруженный кольцами, отличается от других планет большим отклонением оси вращения ( $98^\circ$ ) от нормали к плоскости орбиты.

Плутон в большой мере напоминает наиболее крупные, состоящие из льда спутники Юпитера и Сатурна. Плутон сильно удален от Солнца и потому там так холодно, что метан на его поверхности замерзает.





Юпитер со своими спутниками (слева) и Европа (справа)

Солнечная система на удивление плоская – орбиты всех планет лежат почти в одной плоскости. Лишь у Меркурия и Плутона орбиты заметно отклоняются от этой плоскости. Благодаря значительному эксцентриситету своей эллиптической орбиты Плутон временами оказывается ближе к Солнцу, чем Нептун. Все планеты обращаются по своим орбитам в одном направлении, совпадающем с направлением вращения Солнца вокруг собственной оси. Осевое вращение всех планет (за исключением Венеры и Урана) происходит в том же направлении – против часовой стрелки, если смотреть со стороны северного полюса. Именно так происходит **суточное вращение Земли** вокруг собственной оси. Продолжительность суток составляет 23 часа, 56 минут и 4 секунды. Для Юпитера и большинства астероидов продолжительность суток меньше половины земных, а у Меркурия и Венеры продолжительность суток сопоставима с периодами их обращения по орбитам. Наклонение оси Земли к плоскости орбиты ( $23.5^\circ$ ) ответственно за ежегодное **чередование сезонов** (времен года).

### ПЛАНЕТА ЗЕМЛЯ

По сравнению с другими большими планетами Солнечной системы Земля сравнительно невелика. Будучи самой большой из внутренних планет, она значительно уступает в размерах газовым шарам, каковыми являются внешние планеты-гиганты Солнечной системы. Среднее расстояние от Земли до Солнца составляет приблизительно  $1.5 \times 10^8$  (149 573 000) км. Наша планета движется вокруг Солнца со скоростью 29.8 км/с, совершая за 365.25 суток полный оборот по орбите, которая в большей мере приближается к окружности, нежели орбиты всех остальных планет.

Земля – пятая по размерам большая планета Солнечной системы. Протяженность ее экватора составляет 40 076 км, экваториальный радиус – 6 378 км, полярный радиус – 6 357 км и средний радиус – 6 371 км. Суша занимает около 29 процентов всей поверхности Земли. Масса Земли составляет  $5.976 \times 10^{27}$  г, или приблизительно  $6 \times 10^{21}$  т при средней плотности  $5.517 \text{ г/см}^3$ . Земля – единственная планета, на которой в изобилии имеется вода в жидком состоянии и где существует жизнь.

По мере того, как Земля движется по орбите вокруг Солнца, видимое с Земли положение Солнца на фоне других далеких звезд все время изменяется, так что за год оно прочерчивает на небесной сфере большой круг, называемый **эклиптикой**. Проекция земного экватора на небесную сферу называется **небесным экватором**. Небесный экватор наклонен по отношению к эклиптике на угол  $23.5^\circ$ . Продолжение земной оси образует на небесной сфере две противоположные точки: северный и южный небесные полюса. Небесный экватор и эклиптика пересекаются в двух точках, называемых **точками весеннего и осеннего равноденствий**. Из-за движения Земли по орбите Солнце в своем видимом движении пересекает небесный экватор дважды на протяжении года: в марте при движении из южного полушария в северное и в сентябре – в обратном направлении.

## Земля – планета Солнечной системы

Однако направление оси суточного вращения Земли в пространстве сохраняется лишь приближенно. Постепенное изменение направления земной оси, называемое *прецессией*, происходит с периодом почти в 26 000 лет, на протяжении которых ось описывает в пространстве круговой конус. Исторически прецессия земной оси была третьим из открытых движений Земли – после значительно более очевидных суточного вращения вокруг оси и годового орбитального обращения вокруг Солнца.

Прецессия земной оси вызвана гравитационным воздействием Солнца и Луны на экваториальное «вздутие» Земли. В значительно меньшей степени аналогичное воздействие оказывают силы тяготения других планет. Из-за прецессии земной оси небесные полюса прочерчивают круги на небесной сфере. В современную эпоху Северный небесный полюс отклоняется менее чем на  $1^\circ$  дуги от Полярной звезды. Ближе всего к Полярной звезде полюс подойдет в 2017 году. Через 12 000 лет Северный небесный полюс будет находиться в  $5^\circ$  от Веги. В современную эпоху близости к Южному небесному полюсу нет ни одной сколько-нибудь яркой звезды. Точки равноденствий постепенно смещаются вдоль эклиптики в западном направлении со скоростью 50.2 угловых секунды в год по мере того как небесный экватор меняет свою ориентацию из-за прецессии земной оси.

Ученые используют для изучения Земли полный набор современной аппаратуры, что пока еще невозможно для изучения других планет. Поэтому нам известно немало о строении Земли и ее составе. Человек впервые увидел Земной шар целиком в декабре 1968 года, когда космический корабль Аполлон-8 с астронавтами совершил облет Луны.

Из космоса наша планета выглядит ярко-голубой. При этом наиболее заметны атмосферные явления, главным образом закрученные в спирали облачные структуры. Особенно яркими представляются полярные области благодаря окутывающим их облакам и находящимся за ними сверкающим снежным и ледяным поверхностям. Частично перекрываемые облаками, рисунок которых все время изменяется, ниже видны значительно более темные, черно-синие поверхности океанов, кое-где прерываемые пустынными землями. Зеленые участки земной поверхности, давшие приют жизни на Земле, не так просто разглядеть из космоса, так как они занимают лишь небольшую часть суши, которая в свою очередь составляют малую часть поверхности нашей планеты. К тому же эти обитаемые участки нередко закрыты облаками.



Вид Земли из космоса

У Земли есть только один естественный спутник – Луна, обращающаяся вокруг нашей планеты на среднем расстоянии чуть больше 384 400 км. Луна – один из наиболее крупных спутников планет Солнечной системы. Ее размеры значительны даже по сравнению с самой Землей. Это позволяет рассматривать систему Земля-Луна как двойную планету. Луна – первое из небесных тел, на которое ступила нога человека.

Из-за отсутствия атмосферы поверхность Луны мало подвержена эрозии и потому хранит множество кратеров, шрамов и других следов – свидетелей величественных древних событий, происходивших на ранних стадиях существования Солнечной системы. История Луны хранит еще немало загадок, но несомненно, что именно здесь можно найти ключи к пониманию происхождения Солнечной системы.

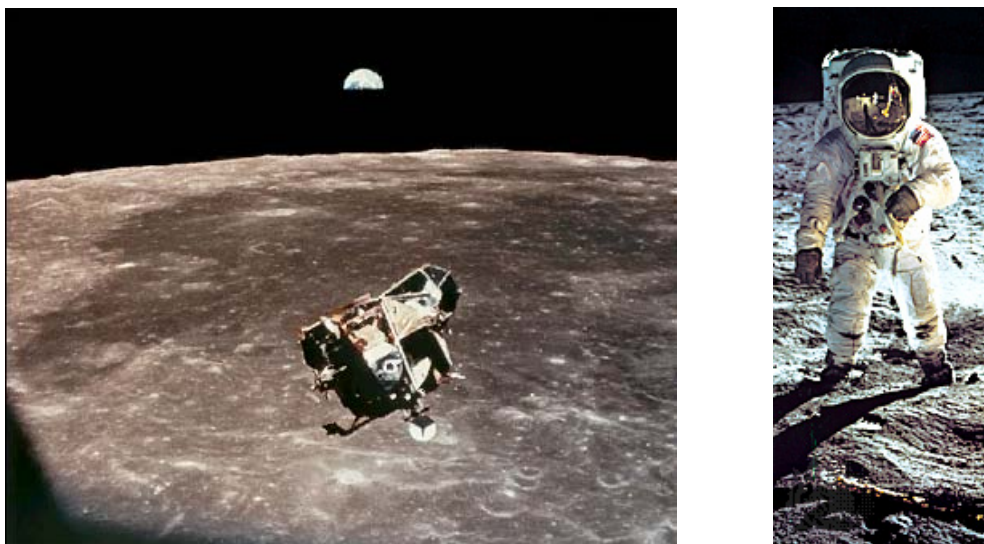


## *Земля – планета Солнечной системы*



Вид Луны в полнолуние и лунный пейзаж

Несмотря на свои различия, по-видимому все члены Солнечной системы образуют единую семью. Скорее всего все они образовались приблизительно в одно и то же время, и лишь немного свидетельств есть о присоединившихся небесных телах, захваченных из межзвездного пространства в более позднюю эпоху.



Лунный модуль Аполлона и астронавт Олдрин на Луне

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗМЫШЛЕНИЯ**

- Почему небесные тела, такие как планеты и их естественные спутники, могут существовать только в движении? Почему не может быть планетной системы с неподвижными планетами? Почему невозможно найти ни одного неподвижного тела (планеты или спутника) в планетной системе и даже в целой галактике? Почему же тогда звезды на небе кажутся нам неподвижными?
- Какими законами физики объясняются наблюдаемые формы (круговые и эллиптические) планетных орбит? Какая особенность закона всемирного тяготения отвечает за существование замкнутых орбит? Сформулируйте требования (физические условия), при которых орбита небесного тела будет в точности эллиптической.
- Первый закон Кеплера утверждает, что под действием центральной силы, обратно пропорциональной квадрату расстояния, тело движется по эллиптической орбите. Какие характеристики этого движения описываются вторым и третьим законами Кеплера?

## *Земля – планета Солнечной системы*

- Какими особенностями строения Солнечной системы обусловлена (приблизительно) эллиптическая форма планетных орбит? Почему орбиты планет можно лишь приближенно рассматривать как эллиптические?
- Гравитационная сила, с которой Солнце притягивает к себе наш естественный спутник – Луну, – превосходит силу, с которой Земля притягивает Луну. Почему же тогда можно говорить о том, что Луна обращается по орбите вокруг Земли? Как выглядит орбита Луны в геоцентрической (т. е. в связанной с Землей) и в гелиоцентрической системах отсчета?
- Какими физическими причинами объясняется (почти) постоянный наклон оси суточного вращения Земли по отношению к плоскости ее орбиты? Этот наклон составляет  $23.5^\circ$ , и благодаря такому наклону на Земле происходит периодическая смена времен года.
- Хотя наклон земной оси на протяжении тысячелетий остается почти неизменным, ориентация оси медленно меняется в пространстве – земная ось описывает в пространстве конус с периодом почти 26 000 лет. Это движение оси называется прецессией, и исторически это третье из открытых движений Земли, после значительно более очевидных суточного осевого вращения Земли и годового обращения по орбите. Из-за прецессии Северный небесный полюс, который в нашу эпоху расположен в пределах  $1^\circ$  от Полярной звезды, через 12 000 лет будет находиться в  $5^\circ$  от Веги. Какие физические причины вызывают эту прецессию земной оси?