

Солнечная система

Магда Ставински, Беатрис Гарсия, Андреа Соса

Международный астрономический союз, Астрономический институт Румынской академии (Румыния), Институт технологий обнаружения астрочастиц (Аргентина), Университет Республики (Уругвай)

Резюме

Несомненно, во Вселенной, в которой мы говорим о звездных и солнечных системах, планетах и экзопланетах, самая известная система — это Солнечная. Можно подумать, что все знают, что такое Солнце, что такое планеты, какие бывают кометы и астероиды. Но так ли это на самом деле? Если мы хотим понять Солнечную систему с научной точки зрения, мы должны сначала знать правила, которые её определяют.

Телами Солнечной системы согласно постановлению Международного Астрономического Союза от 24 августа 2006 г. Являются.

- планеты
- естественные спутники планет
- карликовые планеты
- другие малые тела: астероиды, метеориты, кометы, пыль, объекты пояса Койпера и др.

Обобщая, любая другая звезда, окруженная небесными телами по тем же законам, называется экзопланетной системой. Один из вопросов, на который нужно ответить по этой теме: каково место Солнечной системы во Вселенной? Но он не единственный. В этой главе мы попытаемся представить наиболее важные характеристики нашей и других систем.

Цели

- Узнать, какое место Солнце занимает во Вселенной;
- Узнать, какие тела составляют Солнечную систему.
- Узнать подробности о различных телах Солнечной системы, особенно самых известных.

Солнечная система

Система по определению представляет собой набор элементов (принципов, законов, сил и т. д.), которые взаимодействуют друг с другом в соответствии с рядом принципов или правил.

Для определения Солнечной системы мы укажем элементы множества, состоящего из центральной звезды — Солнца, — и всех тел, его окружающих и связанных с ним силами тяготения.



Рис. 1: Солнечная система в масштабе размеров основных её тел

Солнечная система расположена в одном из внешних рукавов нашей Галактики, также называемой Млечный Путь. Этот рукав известен как рукав Ориона. Он расположен в области относительно небольшой звездной плотности.

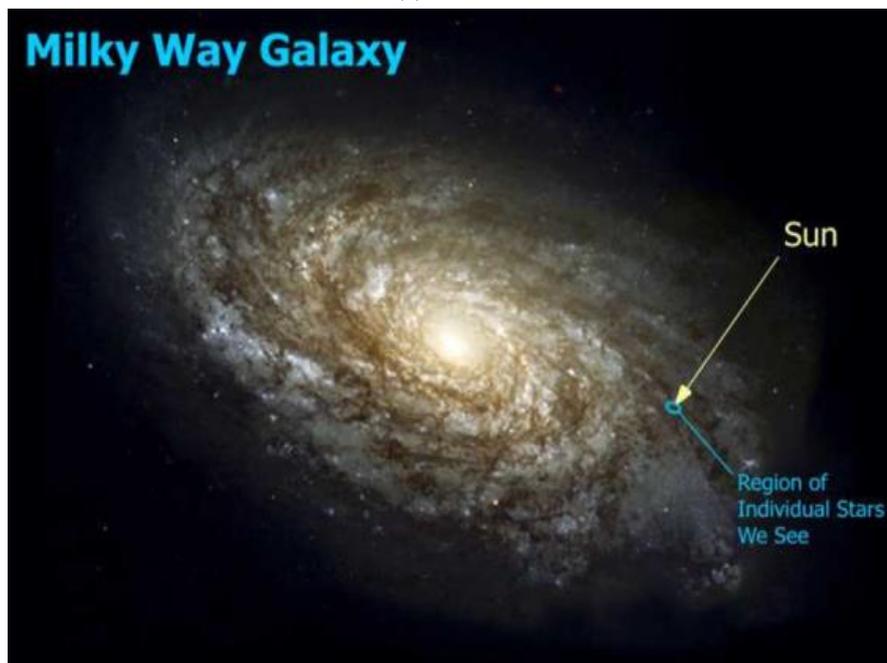


Рис. 2: Место Солнечной системы в Галактике (симуляция)

Солнце вместе со всей Солнечной системой движется вокруг центра Галактики, расположенного на расстоянии от 25000 до 28000 световых лет (примерно на половине её радиуса), с периодом обращения 225-250 миллионов лет (галактический год Солнечной системы). Величина скорость, с которой оно движется по этой почти круговой орбите, составляет около 220 км/с, а направление движения совпадает с направлением к текущему положению звезды Вега.

Наша Галактика состоит из более чем 1000 туманностей и примерно 200 миллиардов звезд вместе с их планетами. Её полная масса примерно в 1000 миллиардов раз больше, чем у Солнца, а её диаметр составляет около 100 000 световых лет.

Очень близко к Солнечной системе находится система Альфа Центавра (самая яркая звезда в созвездии Центавра), состоящая из трёх звезд: пара звёзд Альфа Центавра А и В, похожих на Солнце, которые вращаются на расстоянии 0,2 световых года вокруг красного карлика Альфа Центавра С относительно небольшой светимости. Последняя - ближайшая к Солнцу звезда, она находится на расстоянии 4,24 световых года; поэтому его еще называют «Проксима Центавра» (proxima - близкая)

Наша Галактика является частью группы галактик, называемой Местной группой, состоящей из трех больших галактик и ряда из 30 меньших. Наша Галактика имеет форму спирали с перемычкой. Рукава этой спирали, выходящие из краёв бара и образованных определенным распределением звезд, содержат, кроме других объектов, туманности, межзвёздное вещество и молодые звезды, которые постоянно рождаются из этого вещества. Центр галактики состоит из старых звезд, сосредоточенных в группах сферической формы. В нашей Галактике насчитывается около 200 таких групп, из которых только 150 наиболее изученных. Эти группы сосредоточены в основном в галактическом центре. Солнечная система расположена на 20 световых лет выше плоскости диска Галактики и на расстоянии 28 000 световых лет от центра Галактики. Центр галактики находится в направлении созвездия Стрельца.

Формирование и эволюция

Согласно стандартной теории, Солнечная система была сформирована около 4.6 миллиардов лет назад гравитационным сжатием облака межзвездного газа и пыли. Коллапс облака начался после сильного внешнего возмущения (возможно, взрыва сверхновой), которое заставило гравитационную силу преодолеть давление газа.

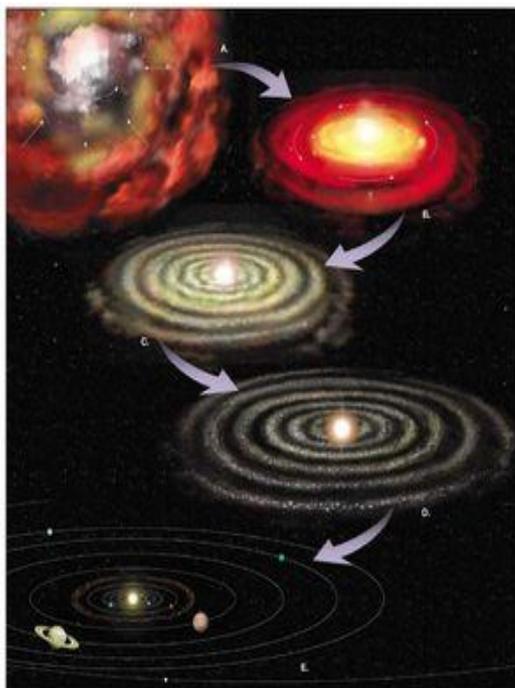


Рис. 3: Схема процесса формирования Солнечной системы, основанная на стандартной «небулярной гипотезе», впервые предложенной Кантом и Лапласом в семнадцатом веке.

Сохранение углового момента заставило туманность вращаться все быстрее и быстрее, сплюснуться и образовать протосолнце в центре, а вокруг него - протопланетный диск из газа и пыли. В протопланетном диске были сконденсированы маленькие твердые ядра планетезималей, которые затем в процессе аккреции накапливали вещество на них, образуя планеты.

Гипотеза примитивной туманности была предложена в 1755 году Эммануилом Кантом, а также отдельно Пьером-Симоном Лапласом.

Стандартная теория (основанная на «небулярной гипотезе», первоначально предложенной Кантом и Лапласом) объясняет компланарность и квазикруглость орбит и была подтверждена наблюдениями нескольких планетных систем вокруг других звезд.

Солнце

Солнце - звезда промежуточной массы, его возраст составляет примерно 4,6 миллиарда лет. В настоящее время Солнце завершило почти половину своего эволюционного цикла, который связан с превращением водорода в гелий в его ядре посредством ядерного синтеза. Каждую секунду в ядре Солнца более четырех миллионов тонн вещества становятся веществом тяжелее и энергией, генерируя не только гелий, но также нейтрино и электромагнитное излучение.

Большая часть Солнца (74%) - это водород, почти 25% - гелий, а остальной 1% — более тяжелые элементы.

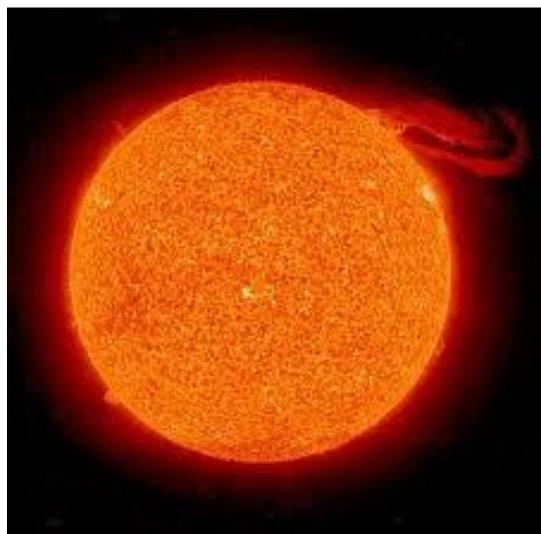


Рис. 4а: Солнце в инфракрасных лучах

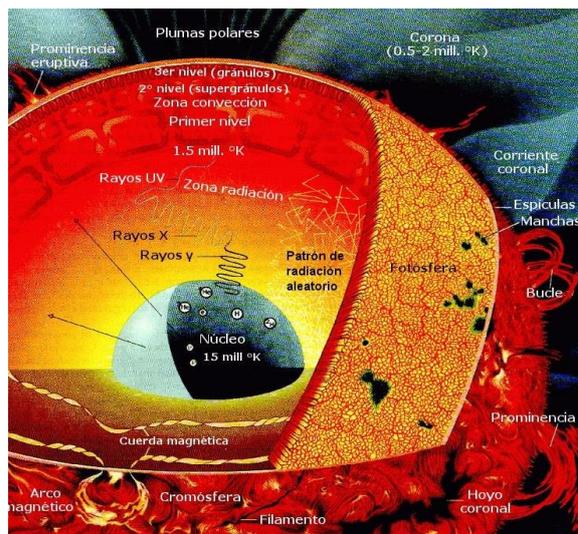


Рис 4б: Внутренняя структура Солнца

Жизненный цикл Солнца

Примерно через 5 миллиардов лет Солнце станет гигантом, а затем белым карликом, окруженным планетарной туманностью. Водород будет истощен, и это приведет к радикальным изменениям, включая полное разрушение Земли. Солнечная активность, точнее ее магнитная активность, оценивается по количеству и размеру пятен на его поверхности, а также по солнечным вспышкам и изменениям солнечного ветра, который рассеивает солнечное вещество в Солнечную систему и за её пределы.

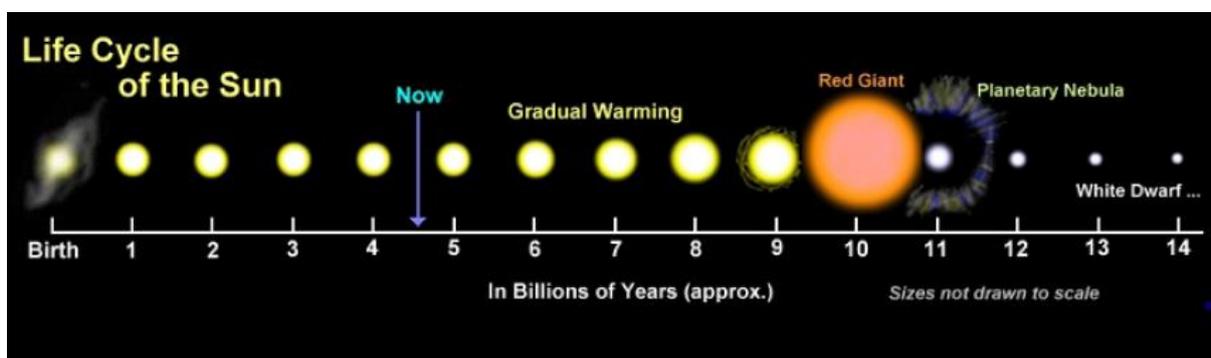


Рис. 5: Жизненный цикл Солнца, от протозвезды до белого карлика.

Планеты

Для классификации планет, мы используем определение, данное Международным Астрономическим Союзом (МАС) на его 26 Генеральной Ассамблее, проведенной в Праге, в 2006 году.

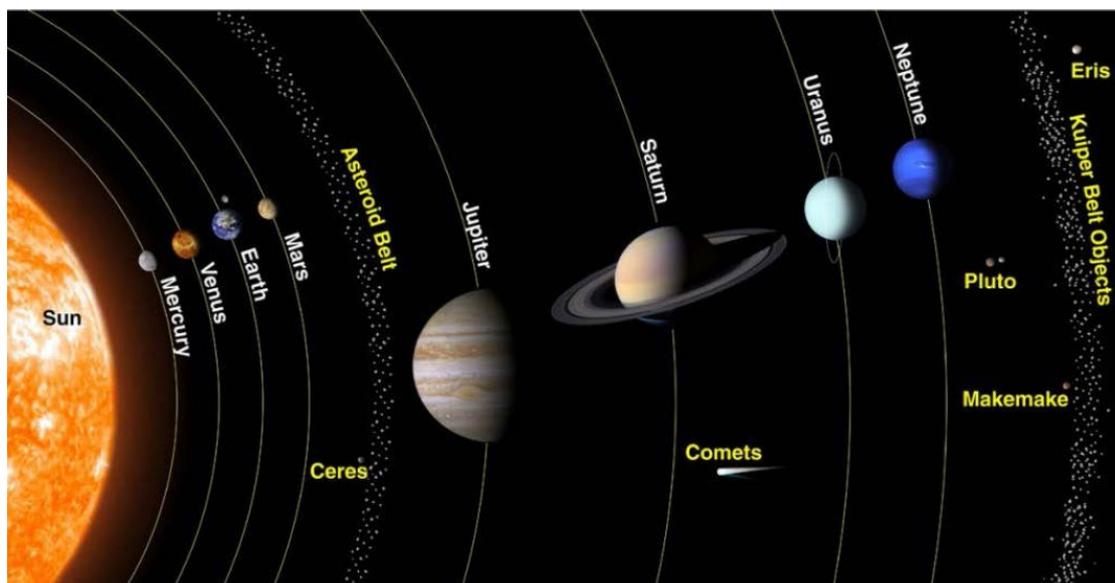


Рис. 6: Тела Солнечной системы. (не в масштабе)

В Солнечной системе планета — это небесное тело, которое:

1. находится на орбите вокруг Солнца,
2. имеет достаточную массу для поддержания гидростатического баланса (почти круглая форма)
3. «очистило окрестности» вокруг своей орбиты.

Тело, не являющееся спутником, которое соответствует только первым двум из этих критериев, классифицируется как «карликовая планета».

Согласно МАС, планеты и карликовые планеты — это два разных типа объектов. Неспутник, отвечающий только первому критерию, называется «малым телом Солнечной системы» (SSSB), как, например, в случае астероидов.

Первоначальные проекты переклассификации тел в Солнечной системе планировали включить карликовые планеты в подкатегорию планет, но поскольку это могло привести к добавлению нескольких десятков новых планет в систему, от этого проекта отказались. В 2006 году были добавлены три карликовые планеты (Церера, Эрида и Макемаке) и переклассифицирована одна (Плутон). Таким образом, в Солнечной системе 2006 года было пять карликовых планет: Церера, Плутон, Макемаке, Хаумеа и Эрида. С годами к списку карликовых планет добавлялись всё новые тела в процессе их открытия и изучения.

Это определение отличает планеты от более мелких тел и бесполезно за пределами Солнечной системы, где мелкие тела не могут быть обнаружены современными технологиями. Внесолнечные планеты или экзопланеты рассматриваются отдельно в соответствии с дополнительным руководством проекта 2003 года по определению планет, которое отличает их от более массивных и крупных карликовых звезд.

8 планет Солнечной системы можно разделить на:

- 4 планеты земного типа во внутренней области (Меркурий, Венера, Земля и Марс): каменные, с приблизительной плотностью от 4 до 5 г/см³;
- 4 планеты-гиганта во внешнем регионе, которые, в свою очередь, делятся на:
 - Газовые гиганты: Юпитер и Сатурн. Более богаты H и He, с химическим составом, аналогичным солнечному;
 - Ледяные гиганты: Уран и Нептун. Лед преобладает над газами, химический состав сильно отличается от солнечного.

Планеты-гиганты легче планет земной группы, их плотность составляет от 0,7 г/см³ (Сатурн) до 2 г/см³.

Планеты-гиганты сформировались в масштабе времени порядка 10 миллионов лет (планеты земной группы образовались примерно за 100 миллионов лет). Они не были сформированы «на месте», а мигрировали из места начального образования: это было вызвано процессами обмена угловым моментом между формирующимися планетами-

гигантами и планетезималями, перенесёнными в другие регионы Солнечной системы или выброшенными из неё насовсем.

Характеристика каждой планеты подразумевает определение ее общих свойств, таких как масса, радиус, плотность, период вращения вокруг своей оси (планетный день), период обращения вокруг Солнца (планетный год), химический состав ее структуры и атмосферы, вместе с другими величинами.

В этом тексте мы не будем приводить таблицы данных, поскольку они доступны в Интернете, вместе с традиционных учебниками. Здесь мы сосредоточимся только на описании природы каждого тела, его происхождения и тех данных, которые представляют интерес, или цвета, чтобы учитель мог работать над этим предметом в классе.

Меркурий

Меркурий — ближайшая к Солнцу и самая маленькая планета Солнечной системы. Это планета земного типа, расположенная во внутренней части Солнечной системы. Она получила свое название от римского бога искусства и торговли.

У Меркурия нет естественных спутников. Это одна из пяти планет, которые можно увидеть с Земли невооруженным глазом. Его смогли наблюдать в телескоп только с семнадцатого века. Его исследованием занимались два космических аппарата: Маринер-10 (трижды в 1974-1975 годах) и Мессенджер (дважды в 2008 году).

Хоть его и можно увидеть невооруженным глазом, его нелегко наблюдать именно из-за его близости к Солнцу. На небе он никогда не отходит от Солнца далеко, наблюдения возможны только во время элонгаций (наибольшего углового расстояния от Солнца), незадолго до рассвета и немного после заката. Однако, космические миссии дали нам достаточно информации, показывающую, как удивительно Меркурий очень похож на Луну.

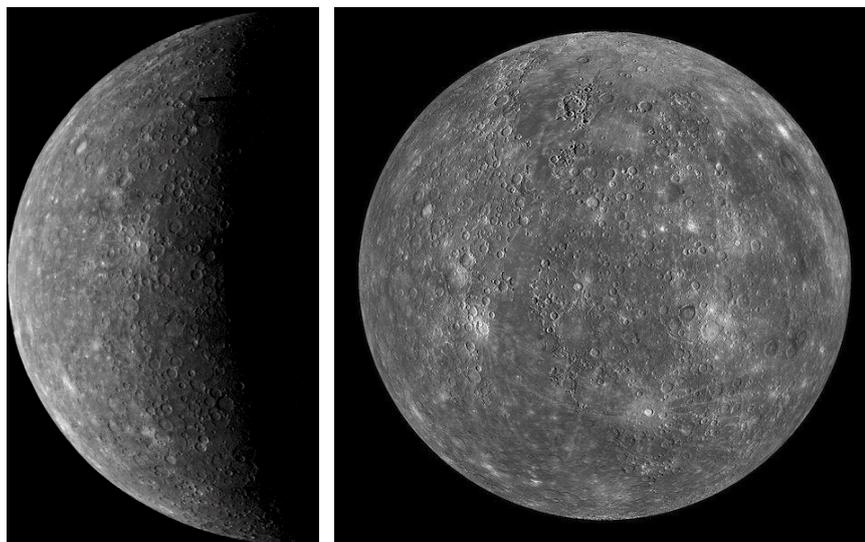


Рис. 7 : Меркурий

Стоит упомянуть некоторые характеристики планеты: она самая маленькая в Солнечной системе и самая близкая к Солнцу. Он имеет наиболее эксцентричную орбиту ($e = 0,2056$) с наибольшим наклоном к эклиптике ($i = 7^\circ$). Его синодический период составляет 115,88 дней, что означает, что три раза в год он оказывается в положении максимальной элонгации к западу от Солнца (так называемая «утренняя звезда», положение максимальной элонгации к востоку от Солнца называют «вечерней звездой»). В обоих случаях элонгация не превышает 28° .

Его радиус в 2440 километров делает ее самой маленькой планетой в Солнечной системе, меньше даже двух галилеевых спутников Юпитера: Ганимеда и Каллисто.

Плотность $5,427 \text{ г/см}^3$ делает ее самой плотной планетой после Земли (чья плотность $5,5 \text{ г/см}^3$). Железо, скорее всего, является основным тяжелым элементом (70% вещества всей планеты), что обуславливает её высокую плотность. Считается, что у Меркурия нет атмосферы, но это неверно: атмосфера, чрезвычайно редкая и очень тонкая, образована молекулярным кислородом (42%), натрием (29,0%), водородом (22,0%), гелием (6,0%), калием (0,5%), а также следами аргона, азота, двуокиси углерода, водяного пара, ксенона, криптона и неона.

Меркурий — единственная планета (кроме Земли), имеющая значительное магнитное поле, которого, хоть оно и порядка $1/100$ магнитного поля Земли, достаточно для создания магнитосферы, простирающейся до полутора радиусов планеты, по сравнению с 11,5 радиусами в случае Земли. Наконец, ещё одна схожесть с Землей: магнитное поле биполярное, с магнитной осью, наклоненной на 11° к оси вращения.

Внутри Меркурия температуры сильно варьируются. Когда планета проходит через перигелий, температура на экваторе в полдень может достигать 427°C : этого достаточно, чтобы вызвать плавление металлов, вроде цинка. Однако, сразу после наступления темноты температура может упасть до -183°C , что означает суточное изменение температуры величиной 610°C ! Ни одна другая планета не обладает таким большим изменением; оно может быть связано с интенсивным солнечным излучением в течение дня, отсутствием плотной атмосферы и продолжительностью дня Меркурия (интервал между восходом и заходом составляет почти три земных месяца), которого достаточно для сохранения тепла или охлаждения в течение ночи аналогичной продолжительности.

Кратеры Меркурия очень похожи на кратеры Луны по морфологии, форме и структуре. Самый примечательный из них — бассейн Калорис, свидетельство великой катастрофы.

Падения, вызывающие кратеры, представляют собой самые катастрофические события, влияющие на поверхность планеты. Они могут вызвать изменение планетарной коры и даже внутренние нестабильности. Так и произошло во время образования кратера Калорис диаметром 1550 километров.

Прецессия перигелия Меркурия

Как и у любой другой планеты, перигелий Меркурия не фиксирован, но движется вокруг Солнца регулярным образом. Долгое время это движение было на 43 угловые секунды в столетие быстрее предсказаний классической ньютоновской небесной механики. Это расхождение было предсказано общей теорией относительности Эйнштейна, причем причиной этого было искривление пространства из-за массы Солнца. Совпадение между наблюдаемым движением перигелия и предсказанием общей теории относительности было большим свидетельством обоснованности этой теории.



Рис. 8: Прецессионное движение перигелия Меркурия

Венера

Одна из четырех планет внутренней системы, по строению аналогичная Земле, вторая по удаленности от Солнца. Названа в честь римской богини любви и красоты.

Близость к Солнцу, а также структура и плотность атмосферы Венеры делают её одним из самых горячих тел в Солнечной системе. Она имеет очень слабое магнитное поле и не имеет естественных спутников. Это одна из немногих планет, вращающаяся вокруг своей оси ретроградно, и единственная, у которой период вращения вокруг оси больше орбитального. Венера — самый яркий объект на небе после Солнца и Луны.

Траектория движения Венеры вокруг Солнца — почти окружность: ее орбита имеет эксцентриситет 0,0068, то есть самый маленький в Солнечной системе. Год Венеры составляет 0,924 её звездного дня.

По размеру и геологическому строению Венера очень похожа на Землю. Атмосфера очень плотная. Смесь CO₂ и плотных облаков двуокиси серы создают самый большой

парниковый эффект в Солнечной системе, с достигаемой температурой около 460 °С. Температура поверхности Венеры выше, чем у Меркурия, хотя Венера почти вдвое дальше от Солнца, и получает только около 25% солнечной радиации, получаемой Меркурием. Поверхность планеты имеет практически равномерный рельеф. Магнитное поле очень слабое, но оно тянет за собой плазменный хвост длиной 45 миллионов километров, впервые обнаруженный космической обсерваторией SOHO в 1997 году.

Замечательной особенностью Венеры является ее ретроградное вращение (хотя у Урана оно тоже есть): она очень медленно вращается вокруг своей оси против часовой стрелки, в то время как планеты Солнечной системы обычно вращаются по часовой стрелке. Период её вращения известен только с 1962 года. Медленное и ретроградное вращение делает солнечные сутки намного короче звездных, причем эти дни длиннее, чем у планет с обычным вращением. Следовательно, в солнечном году Венеры менее 2 полных дней. Причины ретроградного вращения Венеры до сих пор не выяснены. Наиболее вероятным объяснением является столкновение с другим крупным телом при образовании планет Солнечной системы. Возможно также, что атмосфера Венеры повлияла на вращение планеты своей большой плотностью.

Венера имеет уникальную атмосферу: её давление на поверхность достигает 93 атмосфер (9,3 МПа), а состоит она в основном из ~ 96,5% диоксида углерода, ~ 3,5% азота, 0,015% диоксида серы, 0,007% аргона, 0,002% водяного пара, 0,0017% оксида углерода, 0,0012% гелия, 0,0007% неона.

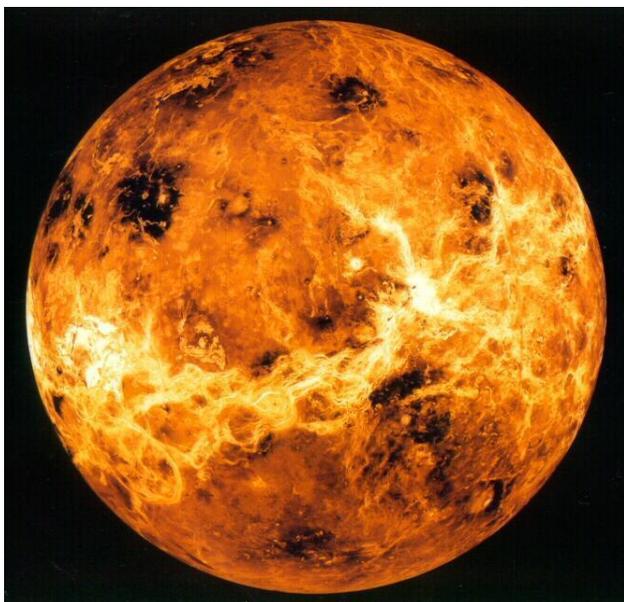


Рис. 9: Поверхность Венеры (Телескоп Магеллан)



Рис. 10: Венера в видимых лучах (Телескоп имени Хаббла)

Венера - двойняшка Земли. Аналогия.

- Они родились в одно время из одного и того же газа и пыли 4,6 миллиона лет назад;
- Обе являются планетами внутренней Солнечной системы;

- Их поверхности имеют разнообразный рельеф: горы, поля, долины, плато, вулканы, ударные кратеры и т. д.
- Обе имеют относительно небольшое количество кратеров, что свидетельствует об относительно молодой поверхности и плотной атмосфере;
- Они имеют близкий химический состав.

Прохождение Венеры по диску Солнца

Прохождение Венеры происходит, когда планета проходит между Землей и Солнцем, а тень Венеры пересекает солнечный диск. Из-за наклона орбиты Венеры по отношению к земной орбите, это явление очень редкое по человеческим меркам. Оно происходит дважды каждые 8 лет, и этот двойное прохождение отделяется от следующего более чем на столетие (105,5 и 121,5 лет). Последние прохождения состоялись 8 июня 2004 г. и 6 июня 2012, следующее нужно ждать 11 декабря 2117 г.

Земля

Земля - третья по удаленности от Солнца планета в Солнечной системе и пятая по размерам. Является планетой внутренней Солнечной Системы. Это самая большая планета Земного типа и единственная с найденной на ней жизнью. Образовалась около 4,57 миллиарда назад; единственный естественный спутник, Луна, начал вращаться по орбите вскоре после образования Земли, около 4 533 миллионов лет назад, существует несколько теорий о его происхождении. 71% поверхности Земли покрыто водой, остальные 29% - твердые и «сухие», но в целом вода составляет крошечное количество вещества по сравнению с общим составом планеты.



Рис. 11: Земля и Луна (Миссия Галилео, 1998)

Между Землей и остальной Вселенной происходит постоянное взаимодействие. К примеру, причиной приливов на Земле является Луна. Кроме того, она постоянно влияла на скорость вращения Земли. Все тела земного шара притягиваются к нему, эта сила притяжения называется силой тяжести, а ускорение, с которым эти тела падают в

гравитационном поле, называется гравитационным ускорением (обозначается « g » = 9,81 м/с²). Считается, что причиной появления Мирового океана стал «ливень» из комет в ранний период существования Земли. Позже, столкновения астероидов помогли решительно изменить окружающую среду. Изменения орбиты планеты можно рассматривать как причины ледниковых периодов, имевшие место в истории, когда поверхность Земли покрывалась слоем льда.

Давление его атмосферы на поверхности составляет 101,3 кПа и состоит из 78% азота (N₂), 21% кислорода (O₂), 0,93% аргона, 0,04% углекислого газа и 1% водяного пара (изменяется с погодой).

Марс

Марс - четвертая от Солнца планета в Солнечной системе и вторая по размерам после Меркурия. Принадлежит к группе планет земного типа. Назван в честь римского бога войны из-за его красноватого цвета. Несколько космических миссий изучали его с 1960 года, чтобы узнать как можно больше о его географии, климате, а также других деталях; они продолжают это делать в поисках воды и, возможно, признаков жизни под его поверхностью.

Марс можно наблюдать невооруженным глазом. Он менее яркий, чем Венера, и лишь изредка ярче Юпитера. Он превосходит последнего в своих наиболее выгодных конфигурациях (противостояниях). Из всех тел Солнечной системы именно красная планета привлекла внимание большинства авторов научной фантастики. Основной причиной этого являются его знаменитые каналы, впервые названные так в 1858 году Джованни Скиапарелли и рассматриваемые этим автором как искусственные, что, как мы знаем сегодня, было совершенно неправильным. Красный цвет Марса обуславливает оксид железа (также называемый гематитом), который содержится в минералах на его поверхности. Марс имеет очень крутой рельеф, с самой высокой горой в Солнечной системе (вулкан Олимп) высотой около 25 км и самым большим из известных каньонов (Долины Маринер) со средней глубиной 6 км.

Эта планета имеет в центре железное ядро диаметром около 1700 км, покрытое оливиновой мантией и базальтовой корой, со средней толщиной 50 км. Марс окружен атмосферой, состоящей в основном из двуокиси углерода. Раньше у него была активная гидросфера, то есть когда-то на его поверхности была вода, но изменения условий атмосферного давления, вероятно, из-за потери его магнитного поля и изменений температуры, привели к испарению воды при комнатной температуре. В настоящее время марсианская атмосфера характеризуется давлением на поверхности 0,6–1,0 кПа и состоит на 95,72% из двуокиси углерода, 2,7% азота, 1,6% аргона, 0,2% кислорода, 0,07% окиси углерода, 0,03% водяного пара; 0,01% оксида азота, а также следов неона, криптона, формальдегида, ксенона, озона и метана.

У Марса есть два естественных спутника, Фобос и Деймос — вероятно, астероиды, захваченные планетой. Диаметр Марса в два раза меньше диаметра Земли, а его поверхность равна поверхности её континентов. Его масса составляет одну десятую

земной. Его притяжение несколько меньше, чем у Меркурия, хотя его масса вдвое больше.

Плоскости экватора Марса и его орбиты вокруг Солнца не совпадают. Наклон оси Марса аналогичен наклону оси Земли, поэтому на Марсе есть времена года, как на Земле. Размеры полярных шапок меняются в зависимости от сезона за счет обмена углекислого газа и воды с атмосферой. Марсианский день всего на 39 минут длиннее земного. А из-за относительного расстояния от Солнца в марсианском году на 322 дней больше, чем в земном.

Марс — ближайшая к Земле внешняя планета, её расстояние до Земли становится ещё меньше во время противостояния, когда Земля находится между Марсом и Солнцем.

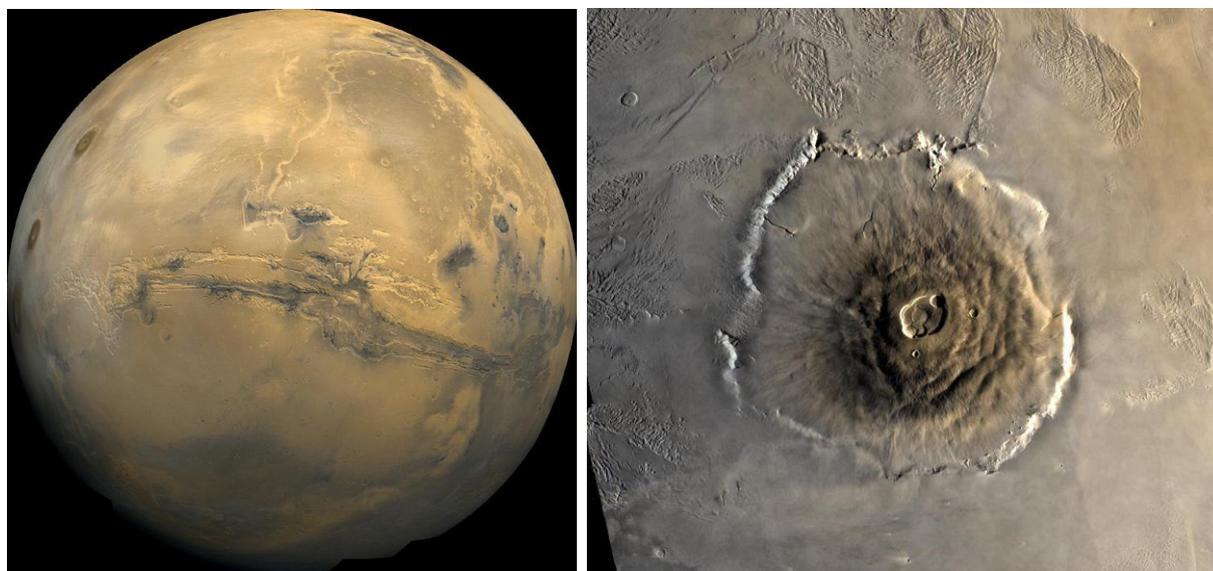


Рис. 12: Марс (слева); Вулкан Олимп (справа)

27 августа 2003 года Марс находился всего в 55,76 млн км от Земли, то есть на 0,3727 астрономических единиц: это наименьшее расстояние, зарегистрированное за 59 618 лет. Такое событие породило множество всевозможных фантазий, например, что Марс можно было бы увидеть размером с Луну. Однако, с видимым диаметром 25,13 угловой секунды Марс можно увидеть невооруженным глазом как точку; а Луна имеет видимый диаметр в 30 угловых минут (1800 угловых секунд). Близость, подобная той, что была в 2003 году, произойдет 28 августа 2287 года, когда расстояние между двумя планетами составит 55,69 миллиона километров.

Юпитер

Юпитер — пятая от Солнца планета, диаметр которой в 11 раз больше диаметра Земли, самая большая из всех планет Солнечной системы. В сравнении с нашей планетой, ее

масса в 318 раз больше, а объем — в 1300 раз. Обращается вокруг Солнца на расстоянии 778 547 200 километров. Юпитер — четвертый по яркости объект на небе, видимый невооруженным глазом (после Солнца, Луны, Венеры и иногда Марса). Открытие Галилео Галилеем и Симоном Мариусом в 1610 году четырех его великих спутников: Ио, Европы, Ганимеда и Каллисто (известных как галилеевы спутники) было первым открытием центра видимого движения, которого не было на Земле. Это было важным свидетельством в пользу гелиоцентрической теории движения планет Николая Коперника. Проверка Галилеем теории Коперника принесла ему неприятности с инквизицией. До миссий «Вояджер» было известно только 16 спутников Юпитера: сегодня мы знаем, что их насчитывается более 60, и наверняка некоторые из них еще предстоит обнаружить.

Предполагается, что ядро планеты сделано из твердого вещества, в 10-15 раз превышающего массу Земли. Над этим ядром находится основная часть планеты, состоящая из жидкого металлического водорода: из-за температуры и давления внутри Юпитера водород является жидкостью, а не газом. В этом состоянии материал является электрическим проводником и источником магнитного поля Юпитера. Также этот слой содержит немного гелия и немного остатков льда.

Самый поверхностный слой планеты состоит в основном из молекулярного водорода и гелия, жидкого во внутренней части и газообразного во внешней части. Атмосфера, которую мы видим, — это только верхняя часть этого глубокого слоя. Вода, диоксид углерода, метан, а также другие простые молекулы присутствуют в небольших количествах.

Атмосфера Юпитера состоит примерно из 86% водорода и 14% гелия со следами метана, воды, аммиака и других элементов. Считается, что его состав очень похож на первоначальную структуру молекулярного облака, из которого образовалась Солнечная система (в этом смысле отличаются Уран и Нептун, которые также являются газообразными, но имеют меньше водорода и гелия в составе).

Отличительной особенностью Юпитера является его Большое красное пятно, которое впервые было замечено благодаря наземным телескопам более 300 лет назад. Это овал размером примерно 12000 на 25000 километров, достаточно большой, чтобы покрыть две Земли. Это область высокого давления, верхние облака которой намного выше и холоднее окружающих областей. Подобные образования наблюдались у Сатурна и Нептуна. Пока неизвестно, почему структуры такого типа так долго сохраняются.

На Юпитере и других газовых планетах ветры дуют с огромной скоростью в большом диапазоне широт. Ветры дуют в противоположных направлениях в двух соседних полосах. Различия в температуре и химическом составе ответственны за различную окраску полос, видимую на изображениях планеты. Атмосфера Юпитера очень неспокойная. Ветры вызываются в основном внутренним теплом планеты, а не Солнцем, как это происходит на Земле. Атмосфера Юпитера имеет поверхностное давление 20-200 кПа (уровень облаков), а ее химический состав - 90% водорода, 10% гелия, ~ 0,3% метана, ~ 0,036% аммиака, ~ 0,003% дейтерия (HD), 0,0006% этана, 0,0004% воды, а также лед из аммиака, воды и гидросульфида аммония (NH₄SH).

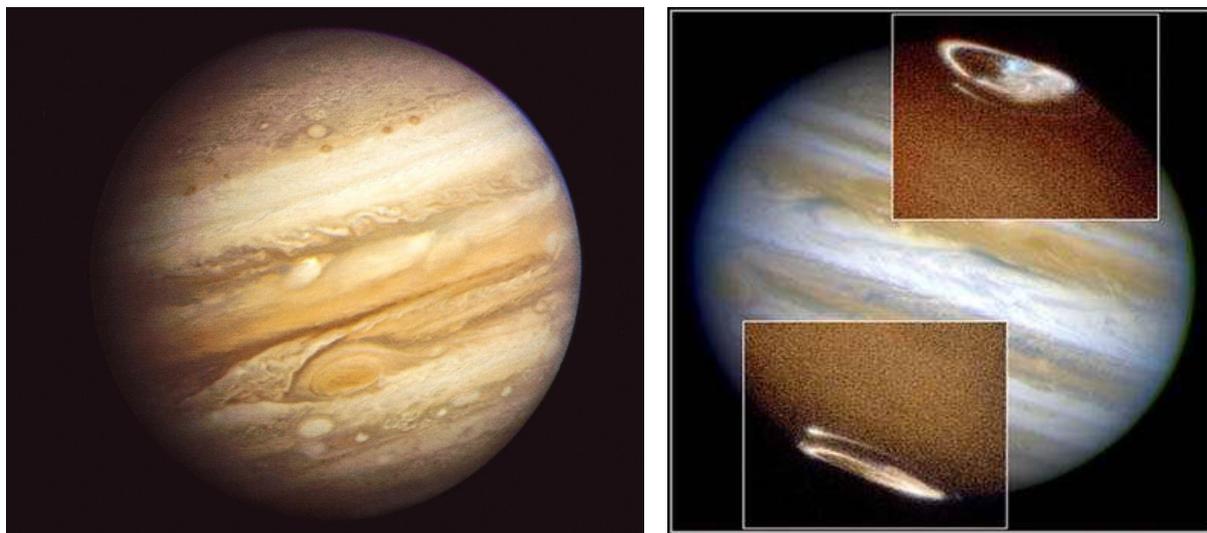


Рис. 14: Юпитер (слева); Полярные сияния на Юпитере (справа, изображение телескопа имени Хаббла)

Магнитосфера Юпитера очень мощная, в 14 раз сильнее, чем у Земли, и простирается примерно на 650 миллионов км (за пределы орбиты Сатурна). Спутники Юпитера включены в его атмосферу, что частично объясняет активность на Ио. Главная проблема космических путешествий будущего, а также задача для разработчиков зондов «Вояджер» и «Галилео» заключается в том, что вокруг Юпитера имеется большое количество заряженных частиц, захваченных его магнитным полем. Это «излучение» похоже, но намного более интенсивное, чем наблюдаемое в поясах Ван Аллена на Земле; оно было бы смертельным для любого незащищенного человека. Зонд «Галилео» обнаружил неизвестное ранее интенсивное излучение между кольцами Юпитера и его верхними слоями атмосферы. Этот новый радиационный пояс имеет интенсивность в 10 раз больше, чем у поясов Ван Аллена на Земле. Удивительно, что он содержит ионы гелия высокой энергии неизвестного происхождения.

У Юпитера есть кольца, подобные Сатурну, но гораздо более тонкие и непрозрачные: в отличие от колец Сатурна, кольца Юпитера темные. Вероятно, они состоят из мелких крупинок каменистого материала и, кажется, не содержат льда. Вероятно, частицы колец Юпитера не задерживаются там надолго (из-за атмосферы и магнитного поля). Зонд «Галилео» обнаружил четкое свидетельство того, что кольца непрерывно подпитываются пылью, образованной при ударах микрометеоритов о внутреннюю часть колец; эти удары очень сильны из-за гравитационного поля Юпитера.

Сатурн

Сатурн, шестая по удаленности от Солнца планета в Солнечной системе, является гигантской газовой планетой, второй по массе и объему после Юпитера (в 3,3 раза

меньше Юпитера, но в 5,5 раз больше Нептуна и в 6,5 раз больше Урана). Он в 95 раз массивнее Земли, его диаметр почти в 9 раз больше земного. Сатурн — единственная планета в Солнечной системе, чей средняя массовая плотность меньше, чем у воды: 0,69 г/см³. Это означает, что его атмосфера, состоящая в основном из водорода, менее плотная, чем вода, но ядро намного плотнее. Состоит в основном из водорода.

Эта планета имеет форму сфероида, сплющенного на полюсах и выпуклого на экваторе. Его экваториальный и полярный диаметр различаются примерно на 10% из-за быстрого вращения вокруг своей оси и очень жидкого внутреннего состава. Другие газообразные планеты-гиганты Солнечной системы (Юпитер, Уран, Нептун) тоже сплюснуты, но в меньшей степени.

Подобно Юпитеру, атмосфера Сатурна состоит из параллельных полос, хоть они и менее заметны и больше на экваторе. Облачные системы Сатурна (а также длительные штормы) были впервые обнаружены миссиями «Вояджер». Облако, наблюдаемое в 1990 году, является примером большого белого пятна, эфемерного феномена Сатурна, который происходит каждые 30 лет. Если периодичность останется прежней, следующая буря, вероятно, произойдет в 2020 году. В 2006 году НАСА наблюдало шторм размером с ураган на Южном полюсе, у которого был четко очерченный циклон. Это единственный циклон, наблюдаемый на другой планете, кроме Земли.

Кольца Сатурна являются одним из самых красивых достопримечательностей Солнечной системы и являются его главным отличием. В отличие от двух других планет-гигантов, которые сравнительно с их темными кольцами очень яркие (альbedo от 0,2 до 0,6), кольца Сатурна можно увидеть в бинокль. Они постоянно изменяются: происходят столкновения, аккумуляция материи и т. д.

У Сатурна большое количество спутников. Сколько их точно, сказать сложно, любой кусок льда из его колец можно считать спутником. В 2009 году было идентифицировано 62 спутника. 53 были подтверждены и им присвоены имена. Большинство из них небольшие: 31 имеют диаметр менее 10 км, 13 - менее 50 км. Только семь достаточно велики, чтобы принимать сферическую форму под действием собственной силы тяжести. Титан — самый большой из них, больше Меркурия и Плутона, и единственный спутник в Солнечной системе с плотной атмосферой, на поверхность которого миссия Кассини поместила зонд Гюйгенс в 2004 году. Миссия изучила этот мир: на нём происходит круговорот, похожий на круговорот воды на Земле, но из метана, элемента, находящегося в трех состояниях на поверхности спутника.

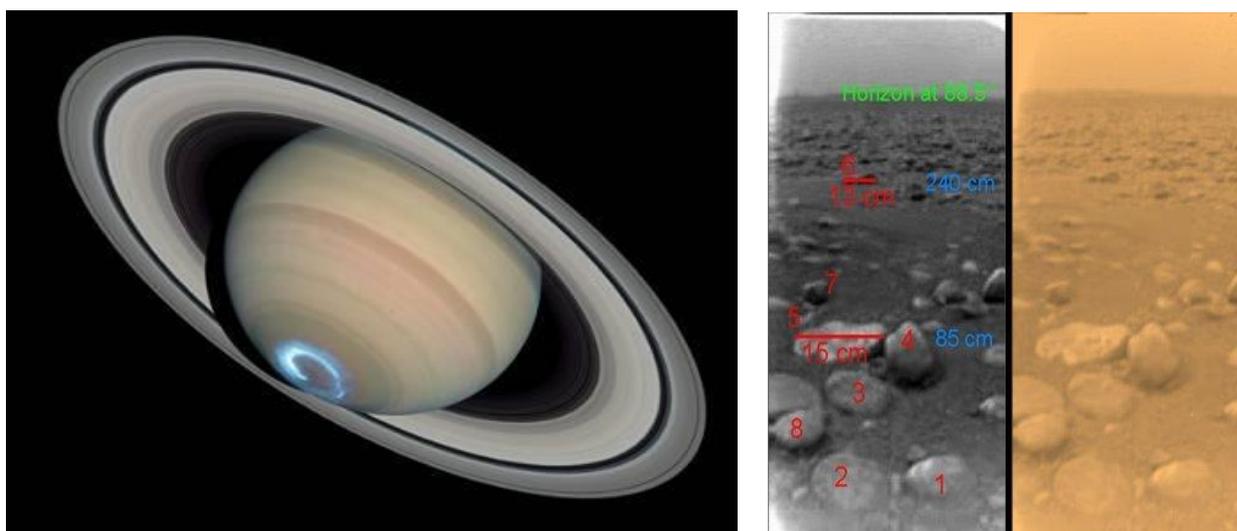


Рис. 14: Полярное сияние Сатурна (слева); последнее фото с поверхности Титана миссии Кассини-Гюйгенс (справа)

Уран

Уран также является газообразной планетой-гигантом и имеет кольца: как минимум 13 главных. Занимает седьмое место в Солнечной системе по удалению от Солнца, третье по размерам и четвертое по массе. Это первая планета, обнаруженная только в телескопическую эпоху. Хотя ее можно увидеть невооруженным глазом, как и другие 5 классических планет, из-за ее слабой светимости ее было нелегко идентифицировать как планету. Уильям Гершель объявил о своем открытии 13 марта 1781 года, тем самым впервые в наше время расширив границы Солнечной системы. Уран — первая планета, обнаруженная в телескоп.

Уран и Нептун имеют внутренний и атмосферный состав, отличный от состава двух других газовых гигантов, Юпитера и Сатурна. Вот почему астрономы иногда относят их к другой категории — замороженным гигантам или субгигантам.

Атмосфера Урана, хотя и состоит в основном из водорода и гелия, также содержит большое количество водяного льда, аммиака и метана, а также следы углеводородов. Уран имеет самую холодную атмосферу в Солнечной системе, которая достигает минимальной температуры $-224\text{ }^{\circ}\text{C}$. Он имеет сложную структуру облаков, нижние слои предположительно образованы из воды, а верхние — из метана. Как и другие газовые планеты-гиганты, Уран имеет кольцевую систему, магнитосферу и многочисленные естественные спутники. Система Урана уникальна в Солнечной системе, потому что его ось вращения практически лежит в плоскости его орбиты. Его северный и южный полюса находятся там, где у других планет находится экватор. В 1986 году «Вояджер-2» получил изображения Урана, показавшие планету без особых характеристик в видимом свете, без облачных слоев или облачных систем, как на других газообразных планетах. Однако недавние наблюдения показали признаки смены времен года и увеличения метеорологической активности, когда Уран приближался к точке равноденствия в декабре 2007 года. Ветер на его поверхности может достигать скорости 250 м/с.

У Урана очень крутая ось вращения, почти параллельная его орбитальной плоскости. Можно сказать, что он вращается по своей орбите и последовательно выставляет на Солнце свой северный и южный полюса. Одним из следствий такой ориентации является то, что полярные области получают больше энергии от Солнца, чем экваториальные. Однако на экваторе Уран теплее, чем на полюсах, и причина этому еще не найдена. Практически все теории о происхождении такого наклона оси содержат идею катастрофического столкновения с другим телом в прошлом.

Период обращения Урана вокруг Солнца составляет 84 земных года. Его среднее расстояние до Солнца — около 3 миллиардов километров. Поток солнечного излучения на Уране составляет около 1/400 от получаемого Землей.

Период вращения внутренних слоев Урана составляет 17 часов 14 минут. Однако, в верхних слоях атмосферы возникают сильные ветры в направлении вращения, как это бывает со всеми газовыми планетами-гигантами. Следовательно, около 60 градусов широты видимые части атмосферы перемещаются быстрее и совершают полный оборот менее чем за 14 часов. Атмосферное давление на Уране меньше 1,3 бар, а её химический состав — 83% водорода, 15% гелия, 2,3% метана, 0,009% дейтерия и следы льда из аммиака, воды, гидросульфида аммония (NH_4SH) и метана (CH_4).

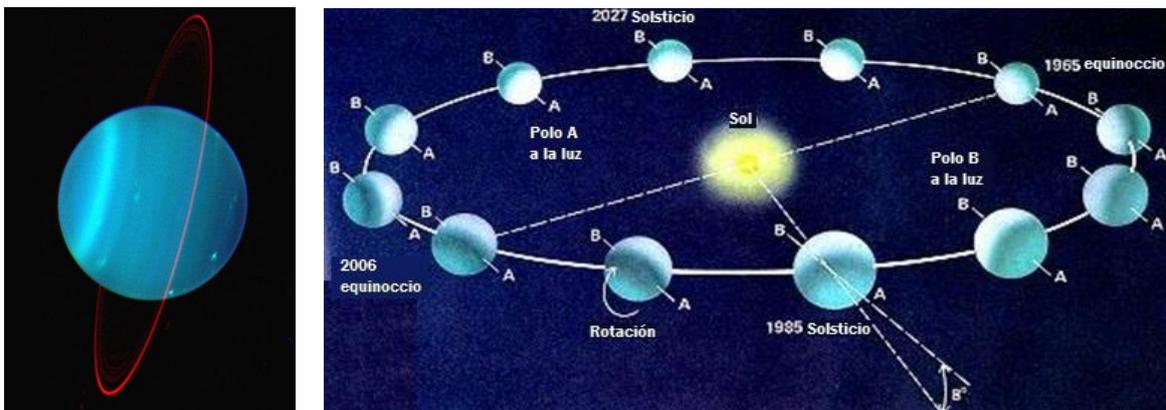


Рис. 15: Уран (слева), и особенности его орбитальное и осевое вращение (справа)

Хотя мы очень мало знаем о его внутреннем составе, мы с уверенностью знаем про наличие отличий от Юпитера или Сатурна. Теоретически, Уран должен иметь твердое ядро из силикатов железа диаметром около 7500 км, окруженное слоем, состоящим из смешанного с гелием, метаном и аммиаком водяного льда, толщиной 10000 км, за которым следует поверхностный слой из водорода и жидкого гелия (~7600 км), медленно испаряющегося в атмосфере. В отличие от Юпитера и Сатурна, Уран не настолько массивен, чтобы удерживать водород в металлическом состоянии вокруг своего ядра. Сине-зеленый цвет обусловлен наличием в атмосфере метана, который поглощает красный и инфракрасный солнечный свет.

У Урана как минимум 27 естественных спутников. Первые два были обнаружены Уильямом Гершелем 13 марта 1787 года и были названы Титанией и Обероном.

Нептун

Нептун - восьмая и самая удаленная от Солнца планета Солнечной системы. Это также последняя планета-гигант. Он был открыт немецким астрономом Иоганном Готфридом Галле 23 сентября 1847 года по указанию Урбано Леверье, который, как и английский астроном Джон Коуч Адамс, открыл его «на кончике пера», и показал, в какой области неба его можно будет наблюдать.

Нептун не виден невооруженным глазом и в телескоп выглядит как сине-зеленый диск. Его только один раз посетил космический зонд "Вояджер-2", который прошел рядом с ним 25 августа 1989 года. Крупнейший спутник - Тритон. Внутренний состав похож на Уран. Считается, что он имеет твердое ядро, состоящее из силикатов и железа, почти такого же размера, как масса Земли. Его ядро, как и ядро Урана, предположительно покрыто довольно однородным составом (лёд, 15% водорода и немного гелия), без «слоёв», как у Юпитера и Сатурна.

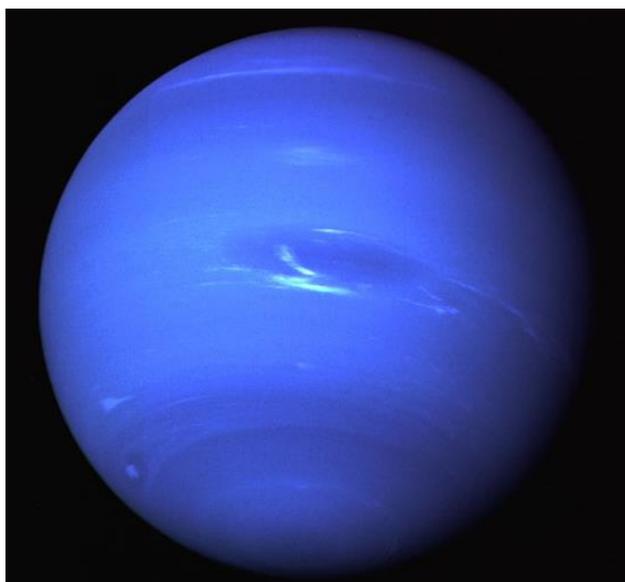


Рис. 16: Нептун

Его голубоватый цвет обусловлен в основном метаном, который поглощает свет красного диапазона. Его атмосфера состоит из 80% водорода, 19% гелия, 1,5% метана, ~0,019% дейтерия, ~0,00015% этана и льда, состоящего из аммиака, воды, гидросульфида аммония и метана.

Как и на других газообразных планетах-гигантах, на Нептуне бушует целая система ветров, образованная очень быстрыми движениями вещества в полосах, параллельных экватору, с сильными штормами и вихрями. Самые быстрые ветры в Нептуне дуют со скоростью более 2000 км/ч. Во время визита «Вояджера-2» наиболее интересным наблюдаемым образованием было «Большое темное пятно», которое, предположительно, размером с «Большое красное пятно» Юпитера. Возможно, что это гигантский темный ураган,двигающийся со скоростью около 1000 км/ч. Планетарные

кольца Нептуна мало заметны, темны и их происхождение до сих пор неизвестно. Нептун имеет по крайней мере 14 естественных спутников, среди которых наиболее важным является Тритон, открытый Уильямом Ласселлом всего через 17 дней после открытия Нептуна.

Карликовые планеты

Система Плутон-Харон и Эрида

Несмотря на существование дюжины подтвержденных карликовых планет, Плутон (среднее расстояние от Солнца 39 а.е.), его спутник Харон и Эрида (планета ещё большего, чем Плутон, размера, после открытия которой произошла реклассификация планет в Солнечной системе), представляются особенно интересными.

Плутон был открыт в 1930 году Клайвом Томбо, считался планетой и был переклассифицирован в августе 2006 года как карликовая планета. Имеет эксцентрическую орбиту, наклоненную на 17° относительно плоскости эклиптики. Его перигелий простирается до 29,7 а. е., а афелий - до 49,5 а. е. Самый большой спутник Плутона, Харон, достаточно велик для того, чтобы оба тела вращались вокруг общего центра масс вне этих планет, т. е. систему Плутон-Харон можно считать двойной. Четыре других малых спутника, Никс, Гидра, Цербер, Стикс, вращаются вокруг пары Плутон-Харон. Плутон находится в орбитальном резонансе 3:2 с Нептуном (за два оборота Плутона вокруг Солнца Нептун обернется три раза).

Эрида была обнаружена в январе 2005 года группой из Паломарской обсерватории под руководством Майкла Э. Брауна. С размерами немного большими, чем Плутон, она считалась десятой планетой до повторной классификации МАС в 2006 году. У неё есть маленький спутник с именем Дисномия. Как и Плутон, Эрида является частью пояса Койпера или транснептуновых объектов.

Другие тела Солнечной системы

Межпланетная среда

Помимо света, Солнце излучает непрерывный поток заряженных частиц (плазмы), называемый солнечным ветром. Этот поток рассеивается со скоростью 1,5 миллиона километров в час, образуя гелиосферу: тонкую атмосферу, которая охватывает Солнечную систему до примерно 100 а.е. (до области гелиопаузы). Вещество, составляющее гелиосферу, называется межпланетной средой. 11-летний солнечный цикл, а также частые солнечные вспышки и корональные выбросы массы нарушают гелиосферу и создают пространственный климат. Вращение солнечного магнитного поля действует на межпланетную среду, создавая при этом нынешнюю гелиосферу, являющейся самой большой структурой Солнечной системы.

Магнитное поле Земли защищает атмосферу от солнечного ветра. Взаимодействие между солнечным ветром и магнитным полем Земли вызывает северное сияние.

Гелиосфера обеспечивает частичную защиту Солнечной системы от космических лучей; эта защита сильнее у планет с магнитным полем.

Межпланетная среда имеет как минимум две области космической пыли в виде диска. Первое, облако зодиакальной пыли, находится внутри Солнечной системы и излучает зодиакальный свет. Вероятно, он образовался в результате столкновения внутри пояса астероидов, вызванного их взаимодействием с планетами. Второй проходит между 10 и 40 а.е. и, вероятно, образовался во время подобных столкновений в поясе Койпера. Это остатки планетарной аккреции, включающие разнообразные популяции астероидов, комет и транснептуновых объектов.

Кометы

Кометы — это небольшие тела Солнечной системы диаметром порядка километров, обычно состоящие из летучих льдов. У них очень эксцентричные орбиты, иногда с перигелием во внутренней Солнечной системе, а афелием за пределами орбиты Плутона. Когда комета входит во внутреннюю часть Солнечной системы, ее близость к Солнцу приводит к сублимации и ионизации ее поверхности, создавая хвост: длинную структуру из газа и пыли.

Короткопериодические кометы (например, комета Галлея) завершают свою орбиту менее чем за 200 лет и, по-видимому, происходят из пояса Койпера. Долгопериодические кометы (например, комета Хейла-Боппа) имеют период в несколько тысяч лет и, предположительно, происходят из облака Оорта — гипотетической области внешней Солнечной системы. Наконец, есть кометы, которые имеют гиперболическую траекторию и, кажется, приходят из-за пределов Солнечной системы. Старые кометы, потерявшие большую часть летучих компонентов, теперь считаются астероидами.

Кентавры, расположенные между 9 и 30 а.е., представляют собой ледяные тела, похожие на кометы, которые вращаются между Юпитером и Нептуном. Самый большой известный кентавр, Харикло, имеет диаметр от 200 до 250 км. Первый обнаруженный кентавр, Хирон, изначально считался кометой, поскольку у него наблюдался кометоподобный хвост. Некоторые астрономы относят кентавров к телам пояса Койпера.



Рис. 17: Комета

Источники малых тел в Солнечной системе

Источники — это относительно стабильные области Солнечной системы, где объекты могут оставаться в течение времени, сравнимого с возрастом системы, до тех пор, пока некая возмущающая сила не изменит их орбиту.

В СС три крупных источника малых тел:

1. Главный пояс астероидов. Другие популяции малых тел происходят из этого региона, например, астероиды, приближающиеся к Земле (известные как NEAS по английской аббревиатуре - Near Earth Asteroid System).

Астероиды — это в основном небольшие тела Солнечной системы, образованные горными породами и нелетучими металлическими минералами. Главный пояс занимает орбиту между Марсом и Юпитером, на расстоянии от 2,3 до 3,3 а.е. от Солнца. Предположительно, астероиды главного пояса являются следами формирования Солнечной системы, которые не смогли образовать более крупное небесное тело из-за гравитационного вмешательства Юпитера.

Размер астероидов варьируется от нескольких сотен километров до микроскопических пылинок. Все, кроме самого большого, Цереры, считаются малыми телами, хотя некоторые из них, такие как Веста и Гигея, могут быть классифицированы как карликовые планеты, если показано, что они достигают гидростатического равновесия. В поясе астероидов находятся тысячи, даже миллионы тел диаметром более километра. Однако общая масса пояса не превышает одной тысячной массы Земли.

Церера (2,77 а.е.) - самое большое тело в поясе астероидов и его единственная карликовая планета (классифицированная как таковая в 2006 году). Её диаметр составляет почти 1000 км, и этого достаточно, чтобы сила тяжести придала ей сферическую форму.

2. Пояс Койпера (транснептуновый). Это область, откуда прилетают короткопериодические кометы. Пояс Койпера представляет собой большое кольцо, образованное обломками похожего на пояс астероидов кольца, но в основном состоящего из льда. Первая часть пояса Койпера простирается между 30 и 50 а.е. от Солнца и заканчивается у «обрыва Койпера», и его вторая часть начинается на 100 а.е. Состоит в основном из малых тел, а также из некоторых более крупных, таких как Кварвар, Варуна или Оркус, которые можно отнести к карликовым планетам. Пояс Койпера можно разделить в основном на «классические» объекты и объекты, резонирующие с Нептуном. Примером этого эффекта могут быть плутини, находящиеся с Нептуном в таком же резонансе, как Плутон (3:2).

3. Облако Оорта. Гипотетическая область, предположительно, имеет сферическое распределение и образовано замороженными планетезималиями, отброшенными планетами-гигантами во время формирования СС. Благодаря возмущениям от близкого прохождения звезд, гигантских молекулярных облаков или галактических приливов,

орбиты некоторых объектов этой области могут измениться, направившись вовнутрь Солнечной системы и становясь долгопериодическими кометами.

Экзомиры

В 1995 году швейцарские астрономы Майкл Майор и Дидье Келоз объявили об обнаружении экзопланеты, вращающейся вокруг 51 Пегаса. Эта звезда и ее планета были названы Гельветий и Димидио в 2015 году после публичного голосования, проводимого МАС.

10 мая 2016 года коллаборация ученых, работающих с телескопом «Кеплер», объявила об обнаружении крупнейшей коллекции экзопланет. Из примерно 5000 кандидатов более 3200 были проверены, и 2325 из них были обнаружены «Кеплером», предназначенным для обнаружения экзопланет земного типа.

Спутник НАСА "Обзор транзитных экзопланет", выведенный на орбиту в 2018 году, использует тот же метод, что и телескоп Кеплера, для наблюдения за 200 000 близлежащими яркими звездами и поиска планет, в особенности размером с Землю или больше (суперземли).

Сколько звезд имеют планетные системы? В скольких из этих экзопланетных систем есть планеты в зоне обитаемости, где вода может быть в жидком состоянии; и в скольких из этих планет в зоне обитаемости существует жизнь? Это вопросы, на которые у современных астрономов пока нет ответа.

Список литературы

- Collin, S, Stavinschi, M., *Leçons d'astronomie*, Ed. Ars Docendi, 2003.
- Kovalevsky, J, *Modern Astrometry*, Springer Verlag, 2002.
- Nato A., *Advances in Solar Research at eclipses, from ground and from space*, eds. J.P. Zahn, M. Stavinschi, Series C: Mathematical and Physical Sciences, vol. 558, Kluwer Publishing House, 2000.
- Nato A, *Theoretical and Observational Problems Related to Solar Eclipses*, eds. Z. Mouradian, M. Stavinschi, Kluwer, 1997.