

Sistema Solar e Exoplanetas

Magda Stavinschi, Beatriz García, Andrea Sosa

International Astronomical Union, Instituto Astronómico da Academia Romena (Roménia), Instituto de Tecnologias em Detecção e Astropartículas e UTN , (Argentina), Universidade da República, (Uruguai).

Resumo

Sem dúvida, num Universo em que falamos de estrelas e sistemas solares, planetas e exoplanetas, o sistema melhor conhecido é o Sistema Solar. Podemos pensar que todos sabem o que é o Sol, o que são planetas, cometas e asteroides. Mas é realmente assim? Se queremos compreender o Sistema Solar de um ponto de vista científico, é necessário distinguir as regras que definem um sistema.

Os corpos do Sistema Solar, de acordo com a resolução da União Astronómica Internacional, de 24 de agosto de 2006), são:

- planetas,
- satélites naturais dos planetas,
- planetas anões,
- outros corpos menores: asteroides, meteoritos, cometas, poeira, objetos da Cintura de Kuiper, etc.

Por semelhança, qualquer estrela rodeada por corpos celestes, de acordo com as mesmas leis que governam o nosso sistema, denomina-se sistema exoplanetário. Uma das questões para responder neste tópico é “Qual é o lugar do Sistema Solar no Universo?”, mas não é a única. Neste capítulo, tentaremos apresentar as mais importantes características do nosso sistema, e de outros.

Objetivos

- Conhecer o lugar que o Sol ocupa no Universo.
- Conhecer quais os objetos que formam o Sistema Solar.
- Conhecer detalhes acerca dos diferentes corpos do Sistema Solar, especialmente dos mais importantes.

Sistema Solar

Um sistema é, por definição, um conjunto de elementos (princípios, normas, forças, etc.), que interagem entre si de acordo com uma série de princípios ou regras.

Para definir o Sistema Solar vamos indicar os elementos do conjunto que são compostos por uma estrela, o Sol, e todos os corpos que o rodeiam e que estão a ele unidos pela força da gravidade.

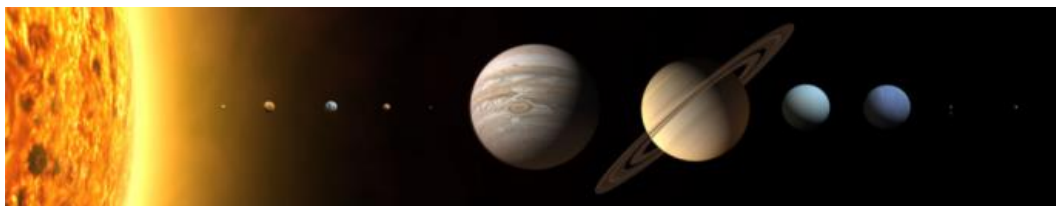


Fig. 1: Sistema Solar. O tamanho dos corpos está à escala.

O Sistema Solar está situado num dos braços exteriores de nossa galáxia, também chamada Via Láctea. Este braço chama-se o braço de Oriote. Está situado numa região de densidade relativamente pequena.

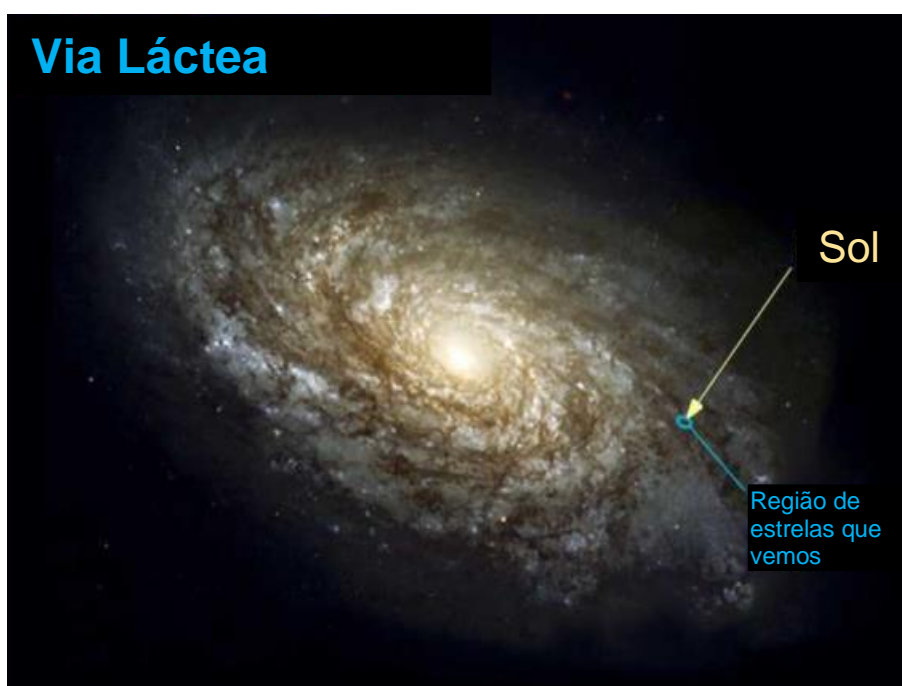


Fig. 2: Localização do Sistema Solar na galáxia (simulação).

O Sol, juntamente com todo o Sistema Solar, está em movimento em redor do centro da galáxia, situado a uma distância de 25 000 a 28 000 anos-luz (aproximadamente metade do raio da galáxia), com um período de revolução de aproximadamente de 225 a 250 milhões de anos (ano galáctico do Sistema Solar). A velocidade com que se desloca ao longo desta órbita circular é de aproximadamente 220 km/s, na direção da posição atual da estrela Vega.

A nossa galáxia é composta por aproximadamente 200 mil milhões de estrelas, juntamente com os seus planetas, e por mais de 1 000 nebulosas. A massa de todo o conjunto é de aproximadamente 1 000 milhões de vezes maior que a do Sol; e o diâmetro é de 100 000 anos-luz.

Próximo do Sistema Solar está o sistema de Alpha Centauri (a estrela mais brilhante da constelação de Centauro), composto por três estrelas, ou seja, um par de estrelas que constituem um sistema binário (Alpha Centauri A e B), semelhantes ao Sol, que giram a uma distância de

0,2 anos-luz em torno de uma anã vermelha, Alpha Centauri C, de luminosidade relativamente pequena. Esta última é a estrela mais próxima do Sol, a uma distância de 4,24 anos-luz, motivo pelo qual também é conhecida como “Proxima Centauri”.

A nossa galáxia é parte de um grupo de galáxias chamado Grupo Local, composto por três galáxias grandes e uma série de outras 30 menores. Nossa galáxia tem a forma de uma espiral barrada. Os braços desta espiral, que parte do final de uma barra composta por uma distribuição particular de estrelas, contêm, entre outras coisas, matéria interestelar, nebulosas e aglomerados de estrelas que se formam a partir dessa matéria. O centro da galáxia é composto por estrelas mais velhas, concentradas em grupos de forma esférica. A nossa galáxia possui aproximadamente 200 destes grupos, dos quais apenas 150 são bem conhecidos. Estes grupos concentram-se, principalmente, no centro da galáxia. O Sistema Solar está situado a 20 anos-luz acima do plano de simetria equatorial e a 28 000 anos-luz de distância do centro galáctico. O centro da galáxia encontra-se na direção da constelação de Sagitário, entre 25 000 e 28 000 anos-luz de distância do Sol.

A formação e evolução do Sistema Solar

De acordo com a teoria mais aceita, o Sistema Solar foi formado há cerca de 4 600 milhões de anos a partir da contração gravitacional de uma nuvem de gás e poeira interestelar. O colapso da nuvem, iniciado por uma forte perturbação (possivelmente uma supernova), provocou um aumento da força gravitacional que se sobrepôs à pressão de gás.

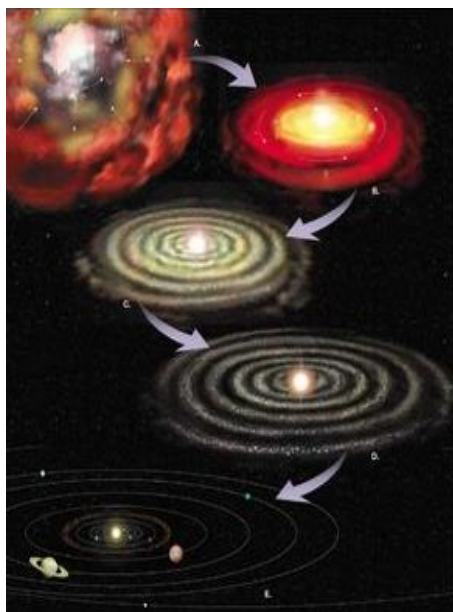


Fig. 3: Esquema da formação do Sistema Solar, de acordo com a teoria mais aceita, baseada na “hipótese nebular”, inicialmente proposta por Kant e Laplace no século XVII.

A conservação do momento angular causou um aumento da velocidade de rotação da nuvem, achatando-a, produzindo um protossol no seu centro, e um disco protoplanetário de gás e poeira em seu redor. No disco protoplanetário foram-se formando pequenos planetesimais de núcleos sólidos, que foram crescendo através de processos de acreção até formar planetas.

A hipótese de uma nuvem primitiva foi proposta em 1775 por Emmanuel Kant e, de forma separada, por Pierre-Simon Laplace.

A teia atualmente aceita (baseada na “teoria nebular” originalmente proposta por Kant e Laplace) explica a coplanaridade e a quase circunferência das órbitas e tem sido confirmada por observações de diversos sistemas planetários em redor de outras estrelas.

O Sol

O Sol é uma estrela de massa intermédia. A sua idade é de aproximadamente 4,6 mil milhões de anos. Atualmente, o Sol completou cerca de metade de seu ciclo de evolução, que está relacionado com a transformação de hidrogénio em hélio, no seu núcleo, através de mecanismos de fusão nuclear. Em cada segundo, no núcleo do Sol, mais de quatro milhões de toneladas de matéria é convertida em matéria mais pesada e em energia, gerando, não apenas hélio, mas também neutrinos e radiação eletromagnética.

A maior parte do Sol (74%) é hidrogénio, quase 25% é hélio, e o restante são elementos pesados.

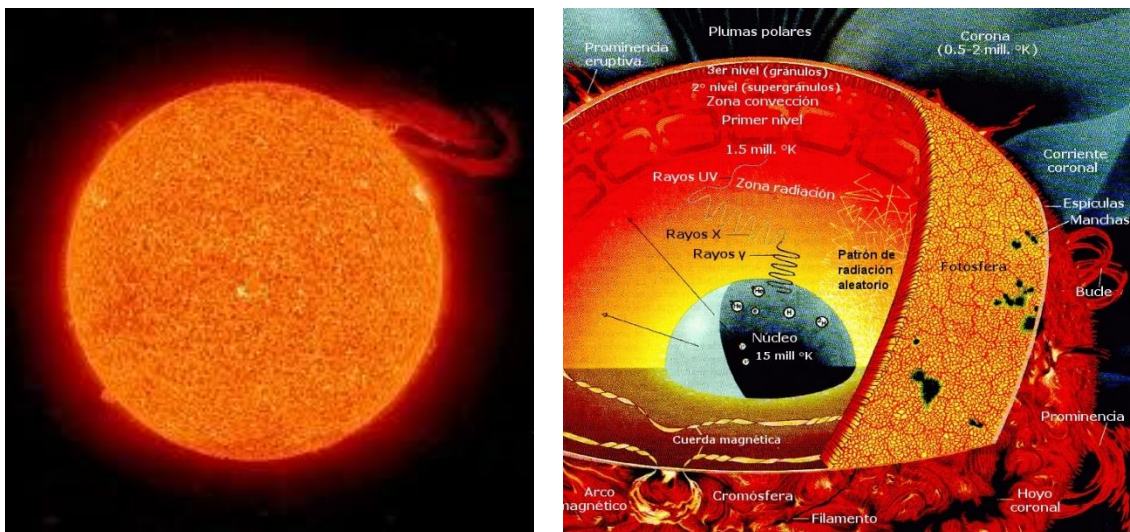


Fig. 4a: O Sol, numa imagem em infravermelho. Fig. 4b: Estrutura interna do Sol.

O CICLO DE VIDA DO SOL

Daqui a cerca de 5 mil milhões de anos, o Sol irá tornar-se gigante e depois uma anã branca, período em que nascerá uma nebulosa planetária. O hidrogénio irá esgotar-se e isso levará a mudanças radicais, incluindo a destruição total da Terra. A atividade solar, mais precisamente a sua atividade magnética, é visualmente detetada pelo número e tamanho das manchas na sua superfície, bem como pelas explosões solares e variações do vento solar, que dissipam a matéria do Sol pelo Sistema Solar e mais além.

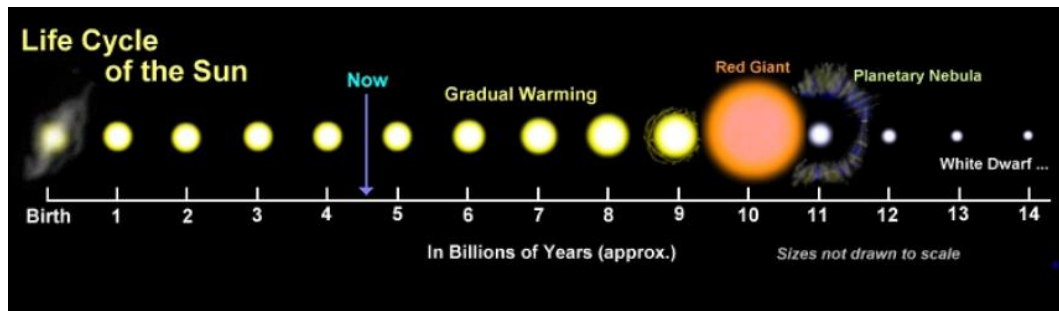


Fig. 5: Ciclo de vida do Sol, desde protoestrela até anã branca.

Planetas

Para a classificação de planetas, será utilizada a definição da União Astronômica Internacional (UAI), na sua 26ª Assembleia Geral, realizada em Praga, em 2006.

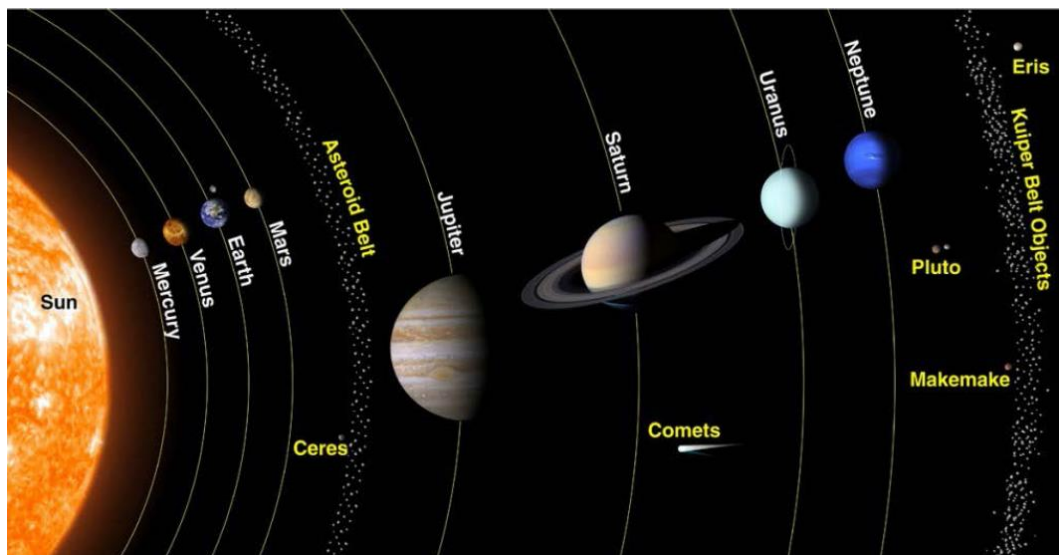


Fig. 6: Corpos do Sistema Solar (a imagem não se encontra à escala).

No Sistema Solar, um planeta é um corpo celeste que:

1. está em órbita ao redor do Sol,
2. possui massa suficiente para manter o equilíbrio hidrostático (forma quase redonda), e
3. contribuiu para “limpar a vizinhança” ao redor da sua órbita.

Um corpo não-satélite que cumpra apenas os dois primeiros destes critérios é classificado como um “planeta anão”.

Segundo a UAI, os planetas e os planetas anões são duas classes distintas de objetos. Um corpo não-satélite que cumpra só o primeiro critério é denominado “pequeno corpo do Sistema Solar” (SSSB), como por exemplo os asteroides.

Os rascunhos iniciais de reclassificação dos corpos previam a inclusão dos planetas anões como uma subcategoria dos planetas, mas como este projeto poderia conduzir ao acréscimo de dezenas de novos planetas no Sistema, essa intenção foi abandonada. Em 2006, foram acrescentados três planetas anões (Ceres, Éris e Makemake) e reclassificado um (Plutão). Desta forma, o Sistema Solar possui, atualmente, cinco planetas anões: Ceres, Plutão, Makemake, Huamea e Éris. Ao longo dos anos outros corpos que se encontravam em estudo foram adicionados à lista de planetas anões.

A definição que distingue planetas de corpos menores e não é útil fora do Sistema Solar, onde não é possível detetar os corpos menores com a tecnologia atual. Os planetas extrassolares, ou exoplanetas, são tratados separadamente por diretrizes complementares de 2003 para a definição de planetas, que os distingue das estrelas anãs, que são maiores e de maior massa.

Os 8 planetas do Sistema Solar podem ser divididos em:

- 4 planetas tipo Terra, na região interior (Mercúrio, Vénus, Terra e Marte).
 - Rochosos, com densidades entre 4 e 5 g/cm³.
- 4 planetas gigantes, na região exterior, que por sua vez estão divididos em:
 - Gigantes gasosos: Júpiter e Saturno. Ricos em H e He, com uma composição química semelhante ao Sol.
 - Gigantes gelados: Urano e Neptuno. Os gelos predominam relativamente aos gases. A sua composição química difere da do Sol.
- Os gigantes gasosos são mais leves que os rochosos, com densidades entre 0,7 g/cm³ (Saturno) e 2 g/cm³.

Os planetas gigantes formaram-se numa escala de tempo da ordem dos 10 milhões de anos (os planetas rochosos demoraram cerca de 100 milhões de anos). Não foram formados "in situ", houve uma migração causada pela alteração do momento angular entre os planetas gigantes em formação e os planetesimais que se moveram para outras regiões do Sistema Solar ou que foram ejetados do Sistema.

Caracterizar cada planeta implica determinar as suas propriedades gerais, como a massa, raio, densidade, período de rotação em torno do seu eixo (dia), período de translação em redor do Sol (ano), composição química da sua estrutura e a sua atmosfera, entre outras. Neste texto não apresentaremos tabelas de dados, já que estas se encontram na Internet, para além dos tradicionais livros. Aqui focaremos atenção apenas na descrição da natureza de cada corpo, a sua origem, dados de interesse ou cor para que o professor possa trabalhar o tema na sala de aula. (Para dados específicos dos planetas e outros corpos do Sistema Solar veja informações na Internet).

Mercúrio

Mercúrio é o planeta mais próximo do Sol e o menor planeta do Sistema Solar. É um planeta do tipo do da Terra, no interior do Sistema Solar. Recebeu o nome do deus romano das artes e do comércio.

Não possui nenhum satélite natural. É um dos cinco planetas que pode ser visto da Terra a olho nu. Foi observado com o telescópio apenas a partir do século XVII. Ultimamente, foi estudado por duas sondas espaciais: Mariner 10 (três vezes em 1974-1975) e Messenger (duas vezes em 2008).

Apesar de ser visto a olho nu, não é facilmente observável precisamente por ser o planeta mais próximo do Sol. Devido à sua posição, que é sempre muito próxima da do Sol, na esfera celeste, apenas pode ser observado perto das elongações, um pouco antes do nascer do Sol e um pouco depois do pôr do Sol. Entretanto, as missões espaciais proporcionaram informação suficiente para mostrar que Mercúrio é, surpreendentemente, muito semelhante à Lua.

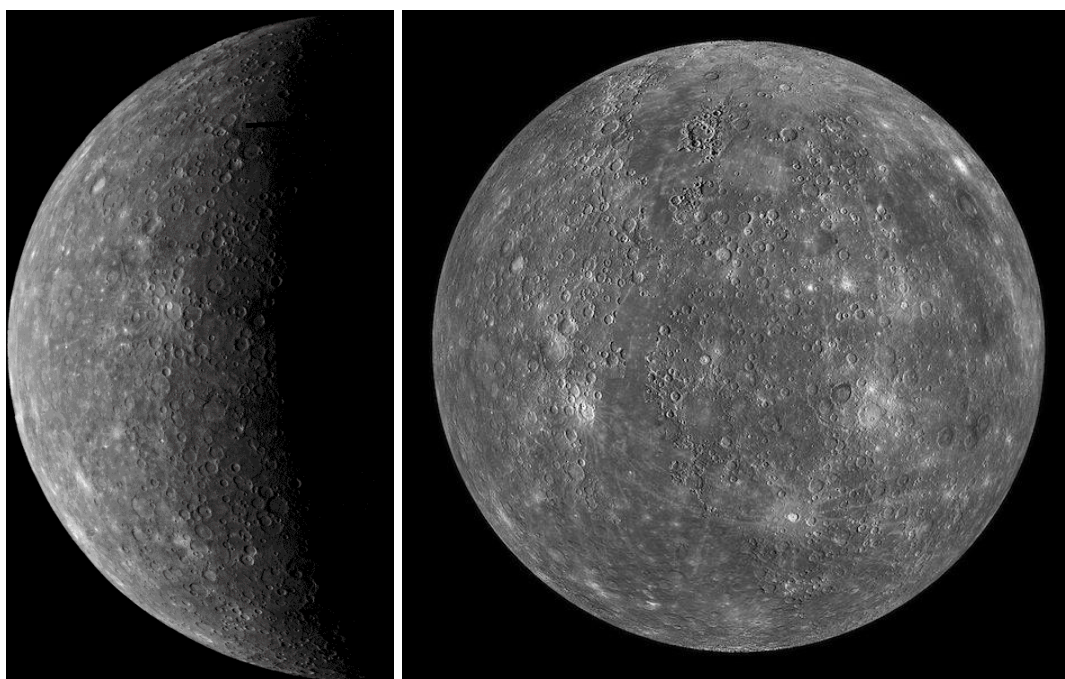


Fig. 7: Mercúrio.

Vale a pena mencionar algumas características do planeta: é o menor do Sistema Solar e o mais próximo do Sol. Possui a órbita mais excêntrica ($e = 0,2056$) e também a mais inclinada, em sentido contrário à eclíptica ($i = 7^\circ$). O período sinódico é de 115,88 dias, o que significa que três vezes por ano está situado numa posição de máxima elongação a oeste do Sol (também é conhecido como “a estrela da manhã”, e nas três posições de máxima elongação a este do Sol é chamado “a estrela da tarde”). Em qualquer destes casos, a elongação não excede os 28° .

O seu raio de 2 440 quilómetros torna-o o menor planeta do Sistema Solar, menor, inclusive, que os dois satélites galileanos de Júpiter: Ganimedes e Calisto.

A densidade de $5,427 \text{ g/cm}^3$ transforma-o no planeta mais denso depois da Terra ($5,5 \text{ g/cm}^3$). O ferro poderá ser o principal elemento pesado (70% contra 30% de matéria rochosa), o que contribuirá para a alta densidade de Mercúrio. Geralmente afirma-se que Mercúrio não tem atmosfera, o que é incorreto, mas a sua atmosfera é extremamente incomum e rarefeita, formada por oxigênio molecular, 42%, sódio, 29,0%, hidrogênio, 22,0%, hélio, 6,0 %, potássio, 0,5%, e vestígios de argon, nitrogênio, dióxido de carbono, vapor de água, xénon, cripton e néon.

Mercúrio é o único planeta, para além da Terra, com um campo magnético significativo que, mesmo sendo da ordem de 1/100 do campo magnético terrestre, é suficiente para criar uma magnetosfera capaz de se estender até 1,5 raios planetários, que no caso da Terra é de 11,5 raios. Por último, há outra analogia com a Terra: o campo magnético é bipolar, com um eixo magnético inclinado 11° relativamente ao eixo de rotação.

As temperaturas variam enormemente em Mercúrio. Quando o planeta passa pelo periélio, a temperatura pode chegar a 427°C no equador ao meio dia, isto é, suficiente para provocar a fusão de um metal como o zinco. No entanto, imediatamente após o anoitecer, a temperatura pode baixar até aos -183°C , fazendo que a variação diurna seja de 610°C ! Nenhum outro planeta sofre uma variação tão grande, que pode ser devido à intensa radiação solar durante o dia, à ausência de uma atmosfera densa e à duração do dia de Mercúrio (o intervalo entre o amanhecer e o entardecer é de quase três meses terrestres), suficiente longo para guardar calor ou, de igual modo, libertar calor durante a noite, em igual proporção).

As crateras de Mercúrio são muito similares às da Lua em morfologia, forma e estrutura. O mais notável é a cratera Bacia Caloris, testemunho de uma grande catástrofe.

Os impactos que geram bacias são os acontecimentos mais catastróficos capazes de afetar a superfície de um planeta. Podem causar alterações de toda a crosta planetária e inclusive desordens internas. Isto foi o que ocorreu quando a cratera Caloris, com um diâmetro de 1 550 quilómetros, foi criada.

Precessão do periélio de Mercúrio

Como para qualquer outro planeta, o periélio de Mercúrio não é fixo, possui um movimento regular ao redor do Sol. Durante muito tempo foi considerado que este movimento era de 43 segundos de arco por século mais rápido do que as previsões da mecânica celeste clássica “newtoniana”. Este avanço do periélio foi previsto pela teoria geral da relatividade de Einstein, sendo originada pela curvatura do espaço como consequência da massa solar. A coincidência entre o avanço observado no periélio e o anunciado pela relatividade geral foi uma prova a favor da validade desta última.

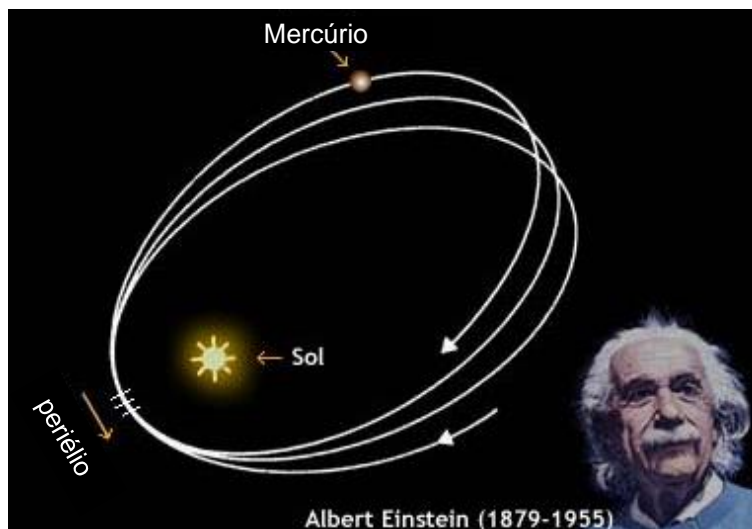


Fig. 8: Precessão do periélio de Mercúrio.

Vênus

Vênus é um dos oito planetas do Sistema Solar e um dos quatro planetas rochosos do sistema interior, sendo o segundo, em distância, ao Sol. Deve o seu nome à deusa romana do amor e da beleza.

A sua proximidade ao Sol, estrutura e densidade da atmosfera de Vênus fazem com que seja um dos corpos mais quentes no Sistema Solar. Conta com um campo magnético muito fraco e não apresenta satélites naturais. É um dos planetas com um movimento de rotação retrógrado e o único com um período de rotação maior que o período da revolução. É o corpo mais brilhante no céu, depois do Sol e da Lua.

A trajetória de Vênus em redor do Sol é quase um círculo: a sua órbita tem uma excentricidade de 0,006 8, isto é, a menor do Sistema Solar. Um ano de Vênus é mais curto que um dia sideral de Vênus, numa razão de 0,924.

O seu tamanho e a sua estrutura geológica são similares à da Terra. A atmosfera é muito densa. A mistura de CO₂ e densas nuvens de dióxido de enxofre criam o maior efeito de estufa do Sistema Solar, com temperaturas de aproximadamente 460 °C. Apesar de Vênus estar aproximadamente duas vezes mais afastado do Sol que Mercúrio, e de só receber aproximadamente 25% da radiação solar que Mercúrio recebe; a temperatura da superfície de Vênus é maior que a temperatura de Mercúrio. A superfície do planeta possui um relevo quase uniforme. O seu campo magnético é muito fraco, porém arrasta uma cauda de plasma com o comprimento de 45 milhões de quilómetros, observada pela primeira vez pela SOHO em 1997.

Uma característica notável de Vênus é a sua rotação retrógrada: gira em redor de seu eixo muito lentamente e em sentido contrário aos ponteiros do relógio, enquanto os planetas do Sistema Solar o fazem frequentemente em sentido horário (há outra exceção: Urano). O seu período de rotação é conhecido apenas desde 1962. Esta rotação – lenta e retrógrada – produz dias solares bem mais curtos que o dia sideral, sendo estes dias mais longos nos planetas com rotação em

sentido horário. Em consequência, há menos de 2 dias completos em cada ano solar de Vénus. A causa da rotação retrógrada de Vénus ainda não foi determinada. A explicação mais provável seria uma colisão gigante com outro corpo de grandes dimensões durante a formação dos planetas do Sistema Solar. Outra hipótese poderia ser que a atmosfera de Vénus, devido à sua grande densidade, influenciasse a rotação do planeta.

Vénus apresenta uma atmosfera única. Com uma pressão à superfície de 93 bar (9,3 MPa) é composta maioritariamente por ~96,5% de dióxido de carbono, ~3,5% de nitrogénio, 0,015% de dióxido de enxofre, 0,007% de árgon, 0,002% de vapor de água, 0,001 7% de monóxido de carbono, 0,001 2% de hélio e 0,000 7% de néon.

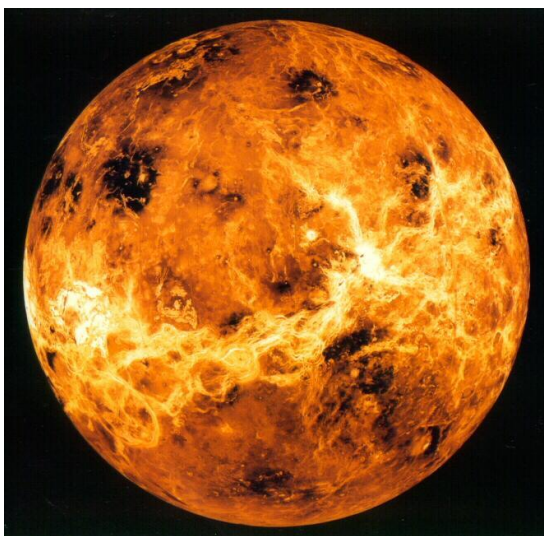


Fig. 9: Vénus. Fotografia da sua superfície (Missão Magalhães).



Fig. 10: Vénus em luz visível (Telescópio Hubble).

Vénus – a irmã gémea da Terra. Analogia

- Nasceram ao mesmo tempo, a partir do mesmo gás e nuvens de pó, há 4,6 mil milhões de anos.
- Ambos são planetas do Sistema Solar interior.
- As suas superfícies possuem um terreno variado: montanhas, campos, vales, planaltos, vulcões, crateras de impacto, etc.
- Ambos possuem um número relativamente pequeno de crateras, indicativo de uma superfície relativamente jovem e de uma atmosfera densa.
- Possuem composições químicas parecidas.

Trânsito de Vénus

O trânsito de Vénus acontece quando o planeta passa entre a Terra e o Sol, e a sombra de Vénus cruza o disco solar. Por causa da inclinação da órbita de Vénus, relativamente à terrestre, este fenómeno é muito raro na nossa escala temporal. Acontece duas vezes em 8 anos, sendo este duplo trânsito separado do seguinte por mais de um século (105,5 e 121,5 anos). Os últimos

trânsitos aconteceram a 8 de junho de 2004 e 6 de junho de 2012. O próximo trânsito deverá acontecer no dia 11 de dezembro 2117.

Terra

A Terra é o terceiro planeta do Sistema Solar mais perto do Sol e o quinto em tamanho. Pertence aos planetas interiores. É o maior planeta telúrico (rochoso) e o único conhecido no Universo onde a vida se adaptou. A Terra formou-se há aproximadamente 4,57 mil milhões de anos atrás. O seu único satélite natural, a Lua, iniciou a sua órbita pouco depois da Terra, há 4,533 mil milhões de anos e há diversas teorias acerca da sua origem. 71% da superfície da Terra está coberta por água, o restante 29,2% é sólido e “seco”, mas a totalidade da água é um pequena porção de matéria da estrutura do planeta.



Fig. 11: Terra e Lua (Missão Galileo, 1998).

Existe uma interação permanente entre a Terra e o resto do Universo. Por exemplo, a Lua é a causadora das marés. Além disso, influencia de forma contínua a velocidade do movimento de rotação da Terra. Todos os corpos que estão na superfície da Terra são atraídos para a Terra, com uma força de atração denominada gravidade, e a aceleração com a qual estes corpos caem no campo gravitacional é chamada aceleração gravítica (é indicada por um “g” = $9,81 \text{ m/s}^2$). Acredita-se que o aparecimento dos oceanos na Terra foi devido a uma “chuva” de cometas no período inicial de formação da Terra. Mais tarde, os impactos de asteroides ajudaram a modificar o meio ambiente de maneira decisiva. As mudanças na órbita do planeta podem ser consideradas como respostas às eras glaciares, que cobriram a superfície terrestre com uma camada de gelo.

A pressão atmosférica à superfície é de 101,3 kPa e esta é composta por 78% de nitrogénio (N_2), 21% de oxigénio (O_2), 0,93% de árgon, 0,04% de dióxido de carbono e 1% de vapor de água (varia com o clima).

Marte

Marte é o quarto planeta do Sistema Solar mais perto do Sol e o segundo menor em tamanho, após Mercúrio (o menor). Pertence ao grupo dos planetas telúricos. Possui o nome do deus romano da guerra, Marte, devido à sua cor vermelha. Várias missões espaciais estudaram o planeta desde 1960 para descobrir o máximo possível a respeito de sua geografia, clima e outros detalhes, e irão continuar a fazê-lo na procura de água e, talvez, sinais de vida, sob a sua superfície.

Marte pode ser observado a olho nu. É menos brilhante que Vénus, algumas vezes mais brilhante que Júpiter. Ultrapassa este último durante as suas configurações mais favoráveis (oposições). De todos os corpos do Sistema Solar, o planeta vermelho é o que mais atraiu a maioria dos autores de ficção científica. A principal razão são seus famosos canais, assim denominados dessa forma pela primeira vez em 1858, por Giovanni Schiaparelli, considerados como o resultado de construções, que hoje sabemos estar completamente errado. A cor vermelha de Marte é devido ao óxido de ferro III (também chamado hematite) encontrado nos minerais da sua superfície. Marte possui um relevo muito abrupto, com a montanha mais alta do Sistema Solar (o vulcão Monte Olympus), com altura de aproximadamente 25 km, ou o maior desfiladeiro (o *Vales Marineris*), com uma profundidade média de 6 km.

Marte possui no seu centro um núcleo de ferro com um diâmetro de aproximadamente 1 700 quilómetros, coberto com um manto de olivina e uma crosta basáltica, com uma espessura média de 50 km. Marte está rodeado por uma atmosfera, composta principalmente de dióxido de carbono. Possuiu uma hidrosfera ativa, isto é, já existiu água em Marte, mas alterações na pressão atmosférica, provavelmente devido à perda do seu campo magnético, e na sua temperatura, provocaram a evaporação da água à temperatura ambiente. Presentemente, a atmosfera marciana é caracterizada por uma pressão à superfície de 0,6-1,0 kPa e é composta por 95,72% de dióxido de carbono, 2,7% de nitrogénio, 1,6% de árgon, 0,2% de oxigénio, 0,07% de monóxido de carbono, 0,03% de vapor de água, 0,01% de óxido nítrico e vestígios de néon, cripton, formaldeído, xénon, ozono e metano.

Marte tem dois satélites naturais, Fobos e Deimos, provavelmente asteroides capturados pelo planeta. O diâmetro de Marte é metade do da Terra e sua superfície é igual à dos continentes. A sua massa é cerca de um décimo da terrestre. A sua gravidade é um pouco menor que a de Mercúrio, ainda que a sua massa seja duas vezes maior.

Os planos do equador marciano e do da sua órbita em torno do Sol não coincidem. A inclinação do eixo de Marte é semelhante ao da Terra, por isso é que em Marte há estações tal como na Terra. As dimensões das calotas polares variam durante as estações através da troca de dióxido de carbono e da água com a atmosfera. O dia marciano é somente 39 minutos maior que o dia terrestre. Devido à sua relativa distância do Sol, o ano marciano dura um pouco mais de 322 dias a mais do que o ano terrestre.

Marte é o planeta exterior mais próximo da Terra. A distância é menor quando Marte está em oposição, ou seja, quando a Terra se encontra entre Marte e o Sol.

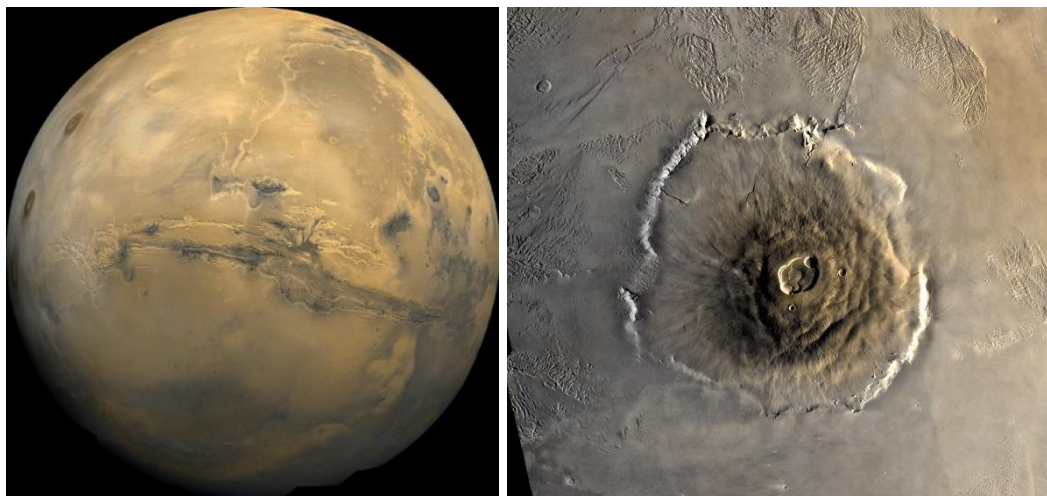


Fig. 12: Marte (esquerda) e Monte Olympus (direita).

Em 27 de agosto de 2003, Marte estava a apenas 55,76 milhões de km de distância da Terra, isto é, a apenas 0,3727 ua, a menor distância registrada nos últimos 59 618 anos. Tal evento propiciou todo o tipo de fantasias, como por exemplo, que Marte iria ser observado tão grande como a Lua Cheia. Com um diâmetro aparente de 25,13 segundos de arco, Marte pode ser visto, a olho nu, como um ponto, enquanto a Lua se estende sobre um diâmetro aparente de aproximadamente 30 minutos de arco (1 800 segundos de arco). Uma proximidade similar acontecerá em 28 de agosto 2287, quando a distância entre os dois planetas irá ser de 55,69 milhões de km.

Júpiter

Júpiter é o quinto planeta mais perto do Sol, com um diâmetro é 11 vezes maior que o da Terra, é o maior de todos os planetas de nosso Sistema Solar. Relativamente ao nosso planeta, a sua massa 318 vezes maior e seu volume de 1 300 vezes maior. Orbita o Sol a uma distância de 778 547 200 km do Sol. Júpiter é o quarto objeto mais brilhante do céu (depois do Sol, da Lua, de Vénus e às vezes de Marte). A descoberta dos seus quatro grandes satélites, Io, Europa, Ganimedes e Calisto (conhecidos como os satélites galileanos), por Galileu Galilei e Simon Marius, em 1610, foi a primeira descoberta de um centro de movimento aparente não centrado na Terra. Foi um importante ponto a favor da teoria heliocêntrica do movimento planetário de Nicolau Copérnico. A confirmação por Galileu da teoria do movimento de Copérnico trouxe-lhe problemas com a Inquisição. Antes das missões Voyager eram conhecidos apenas 16 de seus satélites, que se sabe atualmente serem mais de 60 e, seguramente, alguns ainda por descobrir.

É provável que o seu núcleo seja constituído por material sólido, entre 10 a 15 vezes a massa da Terra. Acima deste núcleo está a parte principal do planeta, composta por hidrogénio metálico líquido: devido à temperatura e pressão no interior de Júpiter o hidrogénio está no estado líquido e não no gasoso. Neste estado físico, este material é um condutor elétrico e a fonte do campo magnético de Júpiter. Esta camada contém um pouco de hélio e alguns restos de gelos.

A camada mais superficial do planeta é composta principalmente por hidrogénio molecular e hélio, líquida por dentro e gasosa por fora. A atmosfera que vemos é só a parte superior desta camada profunda. Água, dióxido de carbono, metano, assim como outras moléculas simples, também estão presentes em pequenas quantidades.

A atmosfera de Júpiter é composta por aproximadamente 86% de hidrogénio e 14% de hélio com vestígios de metano, água, amoníaco e outros elementos. Acredita-se que esta composição será muito parecida com a estrutura original da nebulosa da qual foi formado o Sistema Solar (Urano e Neptuno, também gasosos, têm menos hidrogénio e hélio).

Uma conhecida característica de Júpiter é a Grande Mancha Vermelha (GRS) que foi observada pela primeira vez graças aos telescópios terrestres, há mais de 300 anos. Tem forma oval de aproximadamente 12 000 por 25 000 km, suficientemente grande para abranger duas Terras. É uma região de alta pressão, cujas nuvens superiores são mais altas e mais frias que as zonas circundantes. Estruturas semelhantes foram observadas em Saturno e Neptuno. Não é bem conhecido o porquê destas estruturas resistem tanto tempo.

Em Júpiter, como noutros planetas gasosos, os ventos sopram a alta velocidade em grandes bandas a diferentes latitudes. Os ventos sopram em direções opostas em bandas adjacentes. As diferenças de temperatura ou de composição química são responsáveis pelas distintas colorações das bandas, um aspeto que domina a imagem do planeta. A atmosfera de Júpiter é muito turbulenta. Os ventos são impulsionados, em grande parte, pelo calor proveniente do interior do planeta e não do Sol, como acontece na Terra. A atmosfera joviana tem uma pressão à superfície de 20-200 kPa (camadas de nuvens) e é quimicamente composta por 90% de hidrogénio (H_2), 10% de hélio, ~0,3% de metano, ~0,036% de amoníaco, ~0,003% de hidrogénio deutério (HD), 0,0006% de etano, 0,0004% de água. E também gelos de: amoníaco, água e hidrossulfito de amónia (NH_4SH).

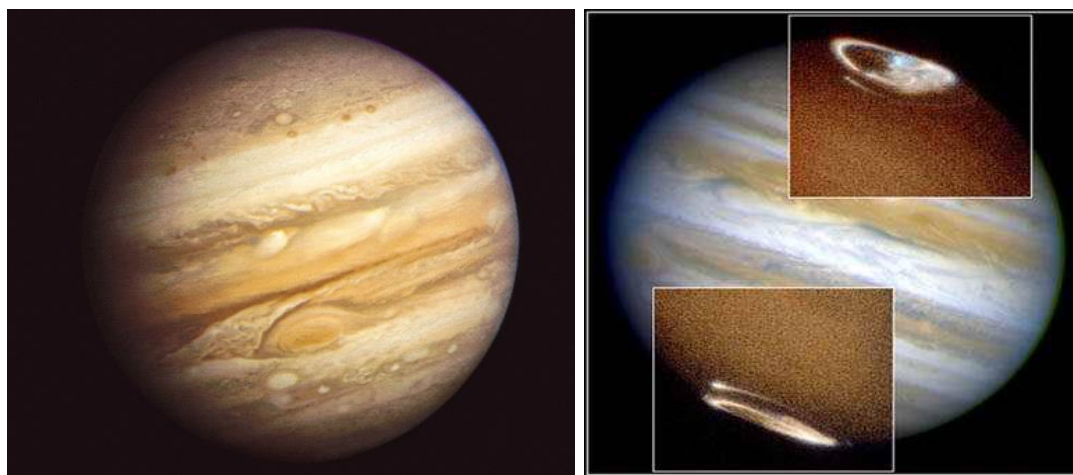


Fig. 13: Júpiter (esquerda). Aurora em Júpiter (direita, imagem do Telescópio Espacial Hubble).

A magnetosfera de Júpiter é muito intensa, 14 vezes mais forte que a da Terra, e estende-se até uns 650 milhões de km (para além da órbita de Saturno). Os satélites de Júpiter incluem-se na sua magnetosfera o que explica, parcialmente, a atividade em Io. Um grande inconveniente para as viagens espaciais do futuro, assim como um problema para os projetistas das sondas Voyager

e Galileo, é que no meio circundante de Júpiter há grandes quantidades de partículas capturadas pelo campo magnético do planeta. Esta “radiação” é semelhante, mas muito mais intensa, que a observada nas cinturas de Van Allen da Terra, que seriam letais para qualquer ser humano sem proteção. A sonda Galileo descobriu uma nova e intensa radiação entre os anéis de Júpiter e as camadas superiores da atmosfera. Esta nova cintura de radiação tem uma intensidade aproximadamente 10 vezes maior que a das cinturas de Van Allen na Terra. Surpreendentemente, esta nova cintura contém íões de hélio de alta energia, de origem desconhecida.

Júpiter possui anéis, tal como Saturno, mas muito mais finos e opacos: ao contrário dos anéis de Saturno, são escuros. São provavelmente compostos por pequenos grãos de material rochoso e não parecem conter gelo. Provavelmente, as partículas dos anéis de Júpiter não permanecem lá durante muito tempo (devido à atmosfera e ao campo magnético). A sonda Galileo encontrou provas claras de que os anéis são continuamente alimentados pelo pó formado por impactos dos micrometeoritos com o interior, que são muito energéticos, devido ao campo gravítico de Júpiter.

Saturno

Saturno é o sexto planeta do Sistema Solar mais distante do Sol. É um planeta gigante gasoso, o segundo em massa e volume, depois de Júpiter (3,3 vezes menor que Júpiter, mas 5,5 vezes maior que Neptuno e 6,5 vezes maior que Urano). A sua massa é 95 vezes superior à da Terra, o seu diâmetro é de quase 9 vezes maior que o da Terra. Saturno é o único planeta do Sistema Solar cuja média massa-volume é menor que a da água: $0,69 \text{ g/cm}^3$. Isto significa que a sua atmosfera, composta principalmente por hidrogénio, é menos densa que a água, mas o seu núcleo é mais denso. Possui um diâmetro aproximadamente nove vezes maior que o da Terra e é composto maioritariamente por hidrogénio.

Saturno apresenta uma forma de esferoide aplanado: é achatado nos polos e inchado no equador. Os seus diâmetros equatorial e polar diferem aproximadamente em 10%, como consequência da rápida rotação ao redor de seu eixo e de uma composição interna muito fluída. Os outros planetas gasosos gigantes do Sistema Solar (Júpiter, Urano, Neptuno) também são aplanados, embora menos.

Tal como Júpiter, a atmosfera de Saturno está organizada em bandas paralelas, ainda que menos visíveis e maiores no equador. Os sistemas de nuvens de Saturno (assim como as tempestades de longa duração) foram pela primeira observados vez pelas missões Voyager. A nuvem observada em 1990 é um exemplo de uma mancha branca grande, um fenómeno efémero de Saturno que acontece a cada 30 anos. Se a periodicidade é a mesma, a próxima tempestade acontecerá provavelmente em 2020. Em 2006, a NASA observou uma tempestade com dimensões de um furacão, estacionado no polo Sul, que continha um olho bem definido. É o único olho observado noutro planeta para além da Terra.

Os anéis de Saturno são um dos espetáculos mais belos do Sistema Solar e constituem a sua principal característica. Ao contrário dos outros dois planetas gasosos gigantes, que são muito brilhantes (albedo dentre 0,2 e 0,6) e impedem a deteção dos anéis que são escuros os anéis de

Saturno podem ser vistos através de um par de binóculos. Possuem uma atividade permanente: colisões, acumulações de matéria, etc.

Saturno possui um grande número de satélites. É difícil dizer quantos possui, já que qualquer pedaço de gelo dos anéis pode ser considerado um satélite. Em 2009 estavam identificados 62 satélites, 53 foram confirmados e nomeados. A maioria deles é pequena: 31 têm um diâmetro menor de 10 km, enquanto 13 são de menores de 50 km. Apenas sete deles são suficientemente grandes para assumir uma forma esférica, sob a influência da sua própria gravidade. Titã é o maior deles, maior que Mercúrio e Plutão, e o único satélite do Sistema Solar com uma atmosfera densa, na qual a missão Cassini largou uma sonda, a Huygens, em 2004. A missão estudou este mundo que produz um ciclo de água semelhante ao da Terra, mas de metano, uma substância encontrada nos três estados físicos na superfície do satélite.

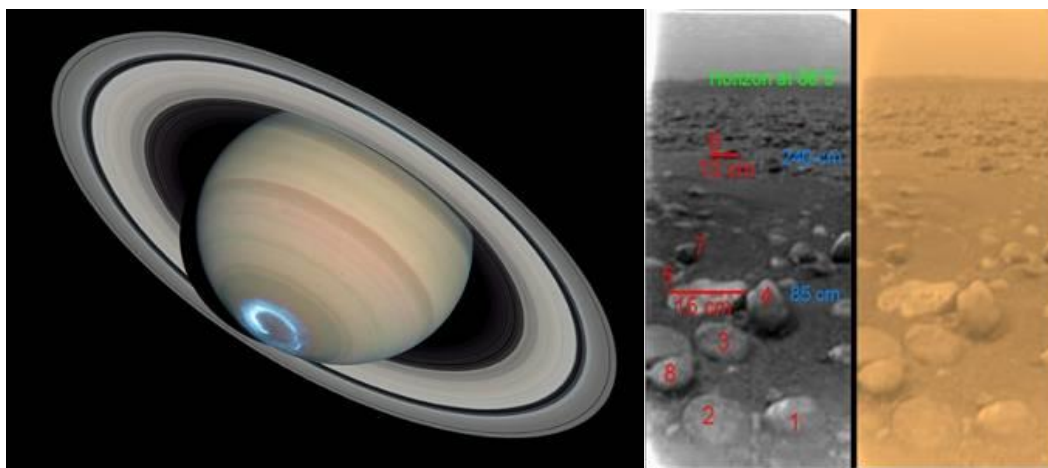


Fig. 14 Aurora em Saturno (esquerda). Foto de Titã pela Missão Cassini- Huygens (direita).

Urano

Urano também é um planeta gigante gasoso e como tal tem anéis: pelo menos 13. É o sétimo mais afastado do Sol, no Sistema Solar, o terceiro em dimensões e o quarto em massa. É o primeiro planeta descoberto na era telescópica. Ainda que possa ser visto a olho nu, tal como os outros 5 planetas clássicos, não era facilmente identificável como planeta por causa da sua pouca luminosidade. William Herschel anunciou sua descoberta em 13 de março de 1781, ampliando desta forma as fronteiras do Sistema Solar pela primeira vez na época moderna. Urano é o primeiro planeta descoberto através do telescópio.

Urano e Neptuno possuem composições internas e atmosféricas diferentes dos outros grandes planetas gasosos, Júpiter e Saturno. Por isso, os astrónomos às vezes os classificam numa categoria diferente, a dos gigantes gelados ou subgigantes.

A atmosfera de Urano é composta principalmente por hidrogénio e hélio, contendo grandes quantidades de gelo de água, amoníaco e metano, e vestígios de hidrocarbonetos. Urano apresenta a atmosfera mais fria do Sistema Solar, atingindo um mínimo de -224 °C . Tem uma estrutura de nuvens complexa: a estrutura dos estratos mais baixos deverá ser constituída por

água e nos estratos superiores por metano. Tal como os outros planetas gigantes gasosos, Urano apresenta um sistema de anéis, uma magnetosfera e numerosos satélites naturais. O sistema de Urano é único no Sistema Solar porque o seu eixo de rotação está praticamente na órbita do seu plano de revolução em redor do Sol. Os seus polos Norte e Sul estão onde os outros planetas possuem o equador. Em 1986 a Voyager 2 obteve imagens de Urano, no visível, que mostram um planeta sem características especiais, sem camadas de nuvens ou tempestades, como nos outros planetas gasosos. No entanto, observações recentes mostraram sinais de mudanças de estação e um aumento da atividade meteorológica, quando Urano se aproximava do seu equinócio de dezembro de 2007. O vento na sua superfície pode atingir a velocidade de 250 m/s.

Ao contrário de qualquer outro planeta do Sistema Solar, Urano apresenta um eixo de rotação muito inclinado, quase paralelo a seu plano orbital. Poderíamos dizer que gira na sua órbita e expõe ao Sol o seu polo Norte e seu polo Sul, sucessivamente. Uma consequência desta orientação é que as regiões polares recebem mais energia do Sol que as equatoriais. No entanto, Urano permanece mais quente no equador do que nos polos, um mecanismo ainda não explicado. Nenhuma teoria sobre a sua inclinação pode ignorar a ideia de uma colisão catastrófica com outro corpo antes de sua formação atual.

O período de revolução de Urano em redor do Sol é de 84 anos terrestres. A distância média ao Sol é de aproximadamente 3 mil milhões de quilómetros. A intensidade do fluxo solar em Urano é de aproximadamente 1/400 da intensidade que a Terra recebe.

O período de rotação das camadas interiores de Urano é de 17 horas e 14 minutos. No entanto, na atmosfera superior há ventos violentos no sentido da rotação, como ocorre com todos os planetas gigantes gasosos. Consequentemente, ao redor dos 60° de latitude, as partes visíveis da atmosfera viajam mais rápido e completam uma rotação completa em menos de 14 horas. A pressão atmosférica é menos de 1,3 bar e a sua composição é de 83% de hidrogénio (H_2), 15% de hélio, 2,3% de metano, e vestígios de deutério e de gelos de amoníaco, de água, de hidrossulfito de amónia (NH_4SH) e de metano (CH_4).

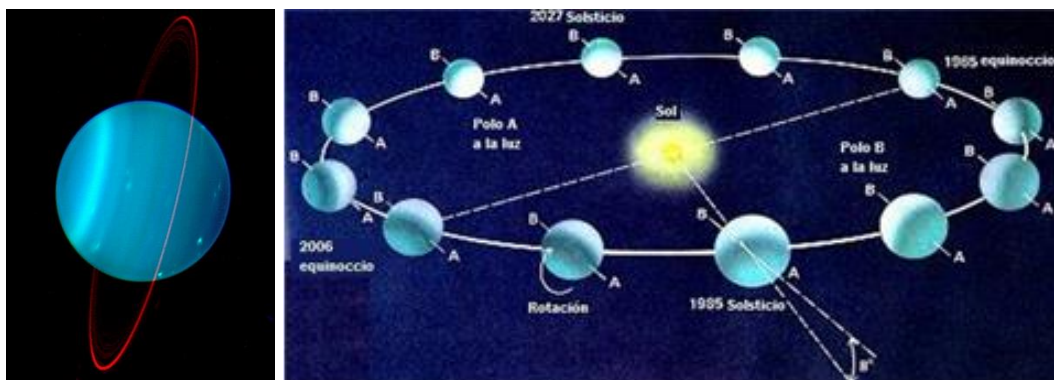


Fig. 15a: Urano (esquerda). Fig. 15b: Órbita de Urano (direita).

Apesar de conhecermos pouco acerca da sua composição interna, sabemos que é diferente de Júpiter ou Saturno. Teoricamente, deverá ter um núcleo sólido de silicatos de ferro, com diâmetro de aproximadamente 7 500 km, cercado por um manto formado por gelo de água

misturado com hélio, metano e amoníaco, com 10 000 km de espessura, seguido por uma camada superficial de hidrogénio e hélio líquido, com aproximadamente 7 600 quilómetros, que lentamente derrete na atmosfera. Ao contrário de Júpiter e Saturno, Urano não é suficientemente massivo para conservar o hidrogénio em estado metálico ao redor do seu núcleo. A cor verde azulada é devida à presença de metano na atmosfera, que absorve o vermelho e o infravermelho da luz solar.

Urano possui pelo menos 27 satélites naturais. Os dois primeiros foram descobertos por William Herschel em 13 de março de 1787 e foram nomeados Titânia e Oberon.

Neptuno

Neptuno é o oitavo planeta e o mais distante do Sol no Sistema Solar. É também o último planeta gigante gasoso. Foi descoberto pelo astrónomo alemão Johann Gottfried Galle, no dia 23 de setembro de 1847, seguindo as indicações de Urbano Le Verrier que, tal como o astrónomo inglês John Couch Adams, tinha previsto através de cálculo a região do céu onde o planeta podia ser encontrado.

Neptuno não é visível a olho nu e é visto como um disco de cor verde azulado através de um telescópio. Apenas foi visitado uma vez, pela sonda espacial Voyager 2, que efetuou uma passagem em 25 de agosto de 1989. O seu maior satélite é Tritão. A sua composição interna é semelhante à de Urano. Acredita-se que possui um núcleo sólido formado de silicatos e ferro, quase da massa da Terra. O seu núcleo, tal como o de Urano, está supostamente coberto com uma composição bastante uniforme (rochas em fusão, gelo, 15% de hidrogénio e um pouco de hélio), e não possui nenhum tipo de estrutura em “camadas” como Júpiter e Saturno.

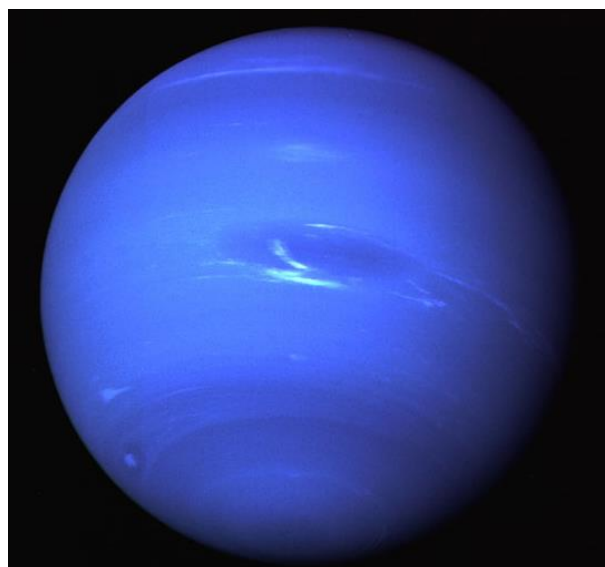


Fig. 16: Neptuno.

A sua cor azulada é devida, principalmente, ao metano, que absorve a luz nos comprimentos de onda do vermelho. A sua atmosfera é composta por 80% de hidrogénio (H_2), 19% de hélio,

1,5% de metano, ~0,019% de deutério (HD), ~0,000 150 de etano e gelos de amoníaco, de água, de hidrossulfito de amónia (NH₄SH) e de metano.

Tal como os outros planetas gigantes gasosos, possui um sistema de ventos formado por ventos muito rápidos em bandas paralelas ao equador, com fortes tempestades e vórtices. Os ventos mais rápidos em Neptuno sopram a mais de 2 000 km/h. Durante a visita da Voyager 2, a formação mais interessante observada foi a “Grande Mancha Escura”, que poderá ser de tamanho da “Grande Mancha Vermelha” em Júpiter. Esta mancha poderá ser um grande furacão escuro que supostamente viaja a cerca de 1 000 km/h. Os anéis de Neptuno são pouco visíveis, escuros, e a sua origem é ainda desconhecida. Neptuno possui pelo menos 14 satélites naturais, entre os quais o mais importante que é Tritão, descoberto por William Lassell apenas 17 dias após a descoberta de Neptuno.

Planetas anões

PLUTÃO-CARONTE E ÉRIS

Apesar de existir uma dúzia de planetas anões confirmados, Plutão (39 ua de distância média), o seu satélite Caronte e Éris, um planeta anão de maior dimensão que Plutão e que definiu a reclassificação desses objetos no sistema Solar, são particularmente interessantes.

Plutão foi descoberto em 1930 por Clive Thombaugh, foi considerado um planeta e foi reclassificado em agosto de 2006 como planeta anão. Possui uma órbita excêntrica inclinada 17° relativamente ao seu plano eclíptico. O seu periélio estende-se até 29,7 ua e o seu afélio até 49,5 ua. O maior satélite de Plutão, Caronte, é suficientemente grande para que o conjunto graveite em volta de um centro de gravidade localizado acima da superfície de cada um dos corpos. Outros quatro pequenos satélites, Nix e Hidra, Cérbero e Estige, orbitam o sistema Plutão-Caronte. Plutão está em ressonância orbital de 3:2 com Neptuno (o planeta orbita duas vezes o Sol, enquanto Neptuno orbita três).

Éris foi descoberto em janeiro de 2005 por uma equipa do Observatório de Palomar liderada por Micheal E. Brown. De tamanho ligeiramente superior a Plutão, foi considerado o décimo planeta até à reclassificação da UAI em 2006. Tem uma pequena lua batizada com o nome de Dismonia. Tal como Plutão, faz parte da Cintura de Kuiper, ou objetos transneptunianos.

Outros Corpos no Sistema Solar

O meio interplanetário

Além da luz, o Sol irradia um fluxo contínuo de partículas carregadas (plasma) chamado vento solar. Este fluxo é dissipado a uma velocidade de 1,5 milhões de km/h, criando assim a heliosfera, uma fina atmosfera que cerca o Sistema Solar até aproximadamente 100 ua (marcando a heliopausa). A matéria que constitui a heliosfera é denominada meio interplanetário. O ciclo solar de 11 anos, bem como as frequentes erupções solares e ejeções de massa coronal, perturba a heliosfera e criam um clima espacial. A rotação do campo magnético

solar atua sobre o meio interplanetário, constituindo a camada heliosférica atual, que é a maior estrutura do Sistema Solar.

O campo magnético terrestre protege a atmosfera do vento solar. A interação entre o vento solar e o campo magnético terrestre provoca as auroras boreais. A heliosfera assegura uma proteção parcial do Sistema Solar dos raios cósmicos, que é maior nos planetas com um campo magnético.

O meio interplanetário possui pelo menos duas regiões de poeira cósmica sob a forma de disco. A primeira, a nuvem de pó zodiacal, está no Sistema Solar interior e produz a luz zodiacal. Foi provavelmente formada por uma colisão no interior da cintura de asteroides causada pelas interações com os planetas. A segunda estende-se entre 10 e 40 ua e provavelmente formou-se durante colisões semelhantes na cintura de Kuiper. São restos de acreções de planetas. Contém diversas populações de asteroides, cometas e objetos transneptunianos.

COMETAS

Os cometas são pequenos corpos do Sistema Solar, com diâmetros da ordem de quilômetros, geralmente compostos por gelos voláteis. Apresentam órbitas muito excêntricas, com o periélio muitas vezes no Sistema Solar interior, enquanto o afélio permanece além de Plutão. Quando um cometa entra no Sistema Solar interior, a sua proximidade ao Sol provoca a sublimação e ionização da sua superfície, criando uma cauda: uma longa cauda formada por gás e pó.

Os cometas de período curto (por exemplo, o cometa Halley) completam a sua órbita em menos de 200 anos e parecem ser originários da Cintura de Kuiper. Cometas de período longo (por exemplo, o cometa Hale-Bopp) possuem uma periodicidade de milhões de anos e talvez surjam da Nuvem de Oort. Finalmente, existem alguns cometas que possuem uma trajetória hiperbólica e parecem vir do exterior do Sistema Solar. Cometas velhos que perderam a maior parte dos seus componentes voláteis são agora considerados asteroides.

Os Centauros, situados entre as 9 e 30 ua, são corpos de gelo semelhantes aos cometas, que orbitam entre Júpiter e Neptuno. O maior centauro conhecido, Chariklo, possui um diâmetro de 200 a 250 km. O primeiro centauro descoberto, Quíron, foi inicialmente considerado um cometa, já que desenvolveu uma cauda como estes. Alguns astrónomos classificam aos centauros como corpos da Cintura de Kuiper.



Fig. 17: Cometa.

RESERVATÓRIOS DE CORPOS MENORES DO SISTEMA SOLAR

Reservatórios são regiões do Sistema Solar relativamente estáveis, onde objetos podem permanecer por tempo comparável com a idade do Sistema, até que alguma perturbação force a sua órbita.

Existem três grandes reservatórios no Sistema Solar:

1. Cintura de Asteroides. Outras populações podem vir desta região, tais como os asteroides que se aproximam da Terra (Conhecidos pelo seu acrônimo em inglês NEAS). Os asteroides são pequenos corpos do Sistema Solar, formados por rochas e minerais metálicos não voláteis. A cintura de asteroides ocupa uma órbita entre Marte e Júpiter, a uma distância entre 2,3 e 3,3 ua do Sol. Podem ser restos do Sistema Solar em formação, que não foram capazes de formar um corpo celeste, devido à interferência de Júpiter.

O tamanho dos asteroides varia desde centenas de quilômetros até partículas microscópicas de pó. Todos, exceto o maior, Ceres, são considerados pequenos corpos, apesar de alguns, como Vesta e Hygeia, possam ser classificados como planetas anões se for demonstrado que atingiram equilíbrio hidrostático. A cintura de asteroides possui milhares, ou mesmo milhões, de corpos com um diâmetro superior a um quilômetro. No entanto, a massa total da cintura não é maior que um milésimo do da Terra.

Ceres (2,77 ua) é o maior corpo na cintura de asteroides e o único planeta anão (classificado assim em 2006). Com um diâmetro de quase 1 000 km, é suficiente para que a sua gravidade lhe confira uma forma esférica.

2. Cintura Transneptuniana. É a região de onde vem os cometas de período curto. A Cintura de Kuiper é um enorme anel formado pelos resíduos provenientes dos escombros de um anel imenso, semelhante ao da cintura de asteroides, mas composto principalmente por gelo. A primeira parte da cintura de Kuiper estende-se entre 30 e 50 ua do Sol e termina no “penhasco de Kuiper”, onde começa a segunda parte até às 100 ua. Acredita-se que esta região é a fonte de cometas de período curto. É composta principalmente por pequenos corpos e por alguns maiores, como Quaoar, Varuna ou Orcus, que poderão vir a ser classificados como planetas anões. A cintura de Kuiper pode ser dividida em objetos “clássicos” e em objetos em ressonância com Neptuno. Um exemplo disto são os plutinos que completam duas órbitas enquanto Neptuno completa três.

3. Nuvem de Oort. Tem uma distribuição esférica e é formada pelos planetesimais gelados lançados para fora, pelos planetas gigantes, durante a formação do Sistema Solar. Graças às perturbações causadas pela passagem de estrelas ou nuvem moleculares gigantes, ou a marés galácticas, as órbitas de alguns destes objetos podem sofrer alteração, atirando-os para o Sistema Solar, transformando-os em cometas de período longo.

EXO MUNDOS

Em 1995 os astrónomos suíços Michael Mayor e Didier Queloz anunciaram a deteção de um exoplaneta orbitando 51 Pegasi. Testa estrela e o seu planeta foram batizados de Helvetios e Dimidio em 2015, depois de uma votação pública, promovida pela UAI.

Em 10 de maio de 2016, a colaboração de cientistas a trabalhar no projeto que orbitou o telescópio Kepler, com a intenção de deteção de exoplanetas terrestres, anunciou a maior coleção de exoplanetas de que há notícia. De um total de 5 000 candidatos, mais de 3 200 foram verificados, e 2 325 desses foram descobertos pelo telescópio Kepler.

O satélite "Transiting Exoplanet Survey" da NASA, colocado em órbita em 2018, usa o mesmo método que o telescópio Kepler para monitorizar 200 000 estrelas brilhantes próximas e procurar exoplanetas, especialmente do tamanho da Terra ou maiores (as super Terras).

Quantas estrelas tem planetas? Quantos desses sistemas exoplanetários têm planetas na zona habitável, onde a água pode estar em estado líquido, e em quantos desses planetas, localizados a uma distância apropriada da estrela, se desenvolveu vida? São questões para as quais os astrónomos modernos não têm, de momento, resposta.

Bibliografia

- 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.