



Os Planetas do Sistema Solar

J. L. G. Sobrinho
sobrinho@uma.pt

Grupo de Astronomia da Universidade da Madeira
<http://www3.uma.pt/Investigacao/Astro/Grupo/index.htm>
Outubro de 2012

Resumo

São apresentadas algumas das características mais marcantes de cada um dos oito planetas principais do Sistema Solar. Em particular são descritas as respectivas superfícies, interiores, atmosferas, magnetosferas e sistema de anéis (quando aplicável). É feita uma descrição semelhante em relação a algumas das luas. Pretende-se com esta apresentação vincar a enorme diversidade apresentada pelos planetas do Sistema Solar e respetivas luas.

Conteúdo

1	Introdução	3
2	Terra	3
2.1	A atmosfera terrestre	3
2.2	O interior da Terra	4
2.3	Campo magnético da Terra	6
2.4	Lua	6
2.4.1	Atmosfera e superfície da Lua	6
2.4.2	Estrutura interna da Lua	7
3	Mercúrio	7
3.1	Superfície de Mercúrio	8
3.2	O interior de Mercúrio	9
3.3	Atmosfera de Mercúrio	9
4	Vénus	10
4.1	A rotação de Vénus	10
4.2	A atmosfera de Vénus e a cobertura de nuvens	10
4.3	Atividade vulcânica	11
4.4	Interior de Vénus	12

4.5	Superfície de Vénus	12
5	Marte	12
5.1	Superfície Marciana	13
5.2	Interior de Marte	15
5.3	Atmosfera Marciana	15
5.4	Água em Marte	16
5.5	Luas marcianas	17
6	Júpiter	17
6.1	Atmosfera de Júpiter	18
6.2	Magnetosfera de Júpiter	20
6.3	Interior de Júpiter	21
6.4	Anéis de Júpiter	22
6.5	Satélites de Júpiter	23
6.5.1	Io	23
6.5.2	Europa	24
6.5.3	Ganimedes	25
6.5.4	Calisto	26
6.5.5	Outros satélites de Júpiter	26
7	Saturno	26
7.1	Atmosfera de Saturno	27
7.2	Magnetosfera de Saturno	27
7.3	Interior de Saturno	27
7.4	Os anéis de Saturno	28
7.5	Titã	30
7.6	Outros satélites de Saturno	31
8	Úrano	32
8.1	Eixo de rotação	32
8.2	Atmosfera	33
8.3	Interior de Úrano	33
8.4	Campo magnético	33
8.5	Anéis de Úrano	34
8.6	Luas de Úrano	34
9	Neptuno	35
9.1	Atmosfera	35
9.2	Interior de Neptuno e campo magnético	36
9.3	Anéis de Neptuno	36
9.4	Tritão	36
	Bibliografia	37

1 Introdução

O Sistema Solar é composto por oito planetas principais (e respetivas luas), cinco planetas anões e uma grande quantidade de pequenos corpos (asteroides, meteoroides, cometas, ...). São descritas aqui as características mais marcantes de cada um dos planetas principais do Sistema Solar. Em particular são descritas as respetivas superfícies, interiores, atmosferas, magnetosferas e sistema de anéis (quando aplicável). É feita uma descrição semelhante em relação a algumas das luas. Pretende-se com esta apresentação vincar a enorme diversidade apresentada pelos planetas do Sistema Solar e respetivas luas. Como bibliografia principal foram utilizadas as obras *Universe* [1] e *Astronomy: A Physical Perspective* [2]. Outras referências utilizadas são indicadas ao longo do texto.

2 Terra

Uma das grandes diferenças entre a Terra e os restantes planetas reside no seu dinamismo. A Terra apresenta, por exemplo, um ciclo da água e a sua superfície é constantemente rejuvenescida por meio de erupções vulcânicas ou através do material expelido por fendas submarinas. Embora a idade da Terra ronde os 4.5 mil milhões de anos a sua superfície tem uma idade da ordem dos 100 milhões de anos.

Existem três fontes de energia responsáveis pelos efeitos dinâmicos observados na atmosfera, oceanos e superfície da Terra: i) radiação solar, ii) forças de maré da Lua, iii) calor interno da Terra. A temperatura média da superfície da Terra é de 287 K (14 °C) o que significa que a Terra emite radiação essencialmente na banda do IV.

2.1 A atmosfera terrestre

A composição atual da atmosfera terrestre é: 78% N_2 , 21% O_2 , 0.035% CO_2 e $\approx 1\%$ H_2O . Nem sempre foi assim. Ao longo da história o material expelido pelos vulcões, por exemplo, alterou gradualmente a composição da atmosfera. Os próprios processos associados à existência de vida também deram a sua contribuição.

O *albedo* da Terra é de 0.4 o que significa que apenas 60% da energia proveniente do Sol é absorvida pela Terra. Os restantes 40% são devolvidos para o espaço. No entanto, devido ao *efeito de estufa*, nem toda a radiação IV emitida pela Terra escapa para o espaço. O efeito de estufa é provocado pelo vapor de água e CO_2 existentes na atmosfera, os quais deixam passar a luz visível mas não deixam escapar a radiação IV. A temperatura média da Terra é, assim, cerca de 40 °C mais elevada do que seria sem o efeito de estufa.

A pressão atmosférica ao nível do mar é de 1 atm. À medida que subimos em altitude a pressão vai diminuindo. No caso da temperatura a variação da altitude pode traduzir-se num aumento do seu valor ou num decréscimo. Tudo depende da forma como cada uma das camadas da atmosfera é aquecida. A seguir indicam-se as diferentes camadas da atmosfera terrestre e algumas das suas características:

- **Troposfera** (0-12 km) é aquecida de baixo para cima pelo calor radiado pela Terra. A condução de calor é feita por intermédio de células de convecção. O **clima** é uma

consequência direta desta convexão. Se o movimento de rotação da Terra fosse muito lento existiria apenas uma célula de convexão levando o ar quente do equador para os polos e trazendo o ar mais frio dos polos para o equador. A velocidade de rotação da Terra é, no entanto, suficiente para quebrar esta célula noutras mais pequenas. Os aviões deslocam-se na troposfera.

- **Estratosfera** (12-50 km). Nesta camada existe o **ozono** que é muito eficiente a absorver a radiação UV proveniente do Sol. Esta camada é, assim, aquecida de cima para baixo o que faz com que aqui a temperatura aumente com a altitude. Não existem células de convexão na estratosfera. Alguns balões meteorológicos sobem até a estratosfera.
- **Mesosfera** (50-85 km). Nesta camada o ozono é praticamente inexistente. A temperatura diminui com a altitude atingindo $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 80 km. Os **meteoros** ocorrem nesta camada da atmosfera.
- **Termosfera** (85-700 km). Nesta camada o azoto e o oxigénio aparecem na forma monoatómica absorvendo a radiação UV de comprimento de onda maior (que o N_2 e o O_2 não absorveriam). Assim, na termosfera, a temperatura aumenta com a altitude. A 300 km de altitude são atingidos cerca de $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. No entanto deve realçar-se que a densidade desta camada é muito baixa (cerca de 10^{-11} a densidade do ar ao nível do mar). Na termosfera podem circular naves espaciais sem grande atrito. A barreira dos 100 km é conhecido por **linha de Kármán**. Cerca de 99.99997% da massa da atmosfera situa-se abaixo desta linha. Por convenção esta linha marca o **início do espaço** (embora a atmosfera continue para cima): a partir daqui os viajantes são considerados astronautas.
- **Exosfera** (700-10 000 km). Trata-se da camada mais externa da atmosfera. É composta por átomos de hidrogénio e de hélio que descrevem autênticas trajetórias balísticas uma vez que as colisões entre eles são extremamente raras.

A **Ionosfera** é a parte da atmosfera que é ionizada pelo vento solar. Começa próximo dos 50 km e engloba as camadas mais exteriores da atmosfera (mesosfera, termosfera e exosfera). Tem grande influência na forma como se propagam as **ondas de rádio**.

2.2 O interior da Terra

A Terra ainda não teve tempo para arrefecer completamente desde o seu processo de formação. O seu interior continua quente. A juntar a isso temos a energia libertada pelo decaimento radioativo do urânio e outros elementos presentes no interior da Terra. No entanto, a energia proveniente do interior da Terra é cerca de 6000 vezes inferior à energia que recebemos do Sol.

A densidade média das rochas encontradas à superfície da Terra é de 3000 kg/m^3 . A densidade média da Terra como um todo ronda os 5515 kg/m^3 . Podemos, assim, concluir que no interior da Terra existem substâncias mais densas do que aquelas que encontramos à superfície. Um bom candidato é o ferro. Os seus átomos são pesados e o ferro é o sétimo elemento mais abundante nesta zona da galáxia (existem elementos mais pesados mas em muito menor abundância). A estrutura interna da Terra consiste num:

- **Núcleo** - zona mais interior da Terra composta por ferro e níquel. Estudando as vibrações da Terra durante a ocorrência de sismos foi possível determinar que o núcleo ocupa apenas

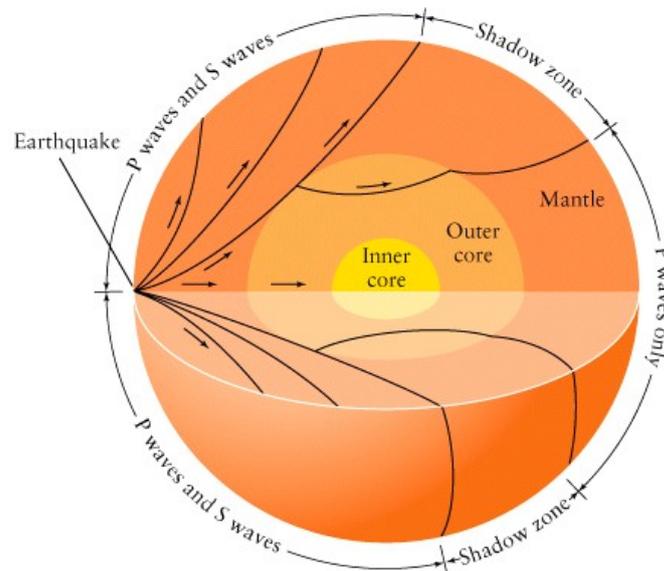


Figura 1: O interior da Terra e a propagação das ondas sísmicas [3].

17% do volume do planeta. O núcleo apresenta duas camadas: uma camada sólida no centro e uma camada líquida ao seu redor.

- **Manto** - composto por minerais ricos em ferro. A espessura do manto atinge os 2900 km. Embora seja sólido as camadas mais externas são plásticas e podem deslizar lentamente.
- **Crusta** - é a camada mais exterior, sendo composta pelos elementos mais leves. A sua espessura varia entre 5 e 35 km. A crosta está dividida em placas que se deslocam sobre o manto provocando ocasionalmente sismos e vulcões. Uma consequência deste movimento, a longo prazo, é a formação de grandes cadeias montanhosas ou de grandes falhas.

Os sismos ocorrem em geral no interior da crosta e a grandes profundidades. Produzem três tipos de ondas sísmicas que se deslocam pela superfície e interior da Terra a diferentes velocidades e de diferentes formas:

- **Ondas de superfície:** são semelhantes às ondas do mar e são aquelas que sentimos junto ao epicentro do sismo.
- **Ondas P e ondas S:** deslocam-se pelo interior da Terra. As ondas P oscilam na mesma direção em que se deslocam. As ondas S oscilam na direção perpendicular ao seu deslocamento.

Os sismógrafos na zona do sismo registam ondas S e P. Em zonas do lado oposto da Terra apenas detetam ondas P. Isto acontece porque as ondas S não se propagam em líquidos e o interior da Terra (manto) é líquido. O estudo das ondas P permite sondar as regiões mais interiores da Terra. Grande parte das ondas P é refletida pela camada mais externa do núcleo ao passo que uma pequena fração atravessa esta camada sendo apenas refletida pela camada mais interna. Assim ficamos a conhecer a estrutura interna da Terra (Figura 1).

2.3 Campo magnético da Terra

O campo magnético da Terra resulta do movimento de cargas elétricas na camada exterior do núcleo. A polarização magnética das rochas vulcânicas com mais de 30 000 anos apresenta-se invertida em relação à verificada atualmente. Isto significa que a polarização do campo magnético da Terra deve ter-se invertido algures no passado.

O campo magnético da Terra interage fortemente com o vento solar (composto maioritariamente por prótons e eletrões) desviando o fluxo de partículas do seu trajeto normal. Nas proximidades da Terra o vento solar desloca-se à velocidade supersónica de aproximadamente 450 km/s.

A zona em torno de um planeta na qual o movimento de partículas com carga elétrica passa a ser dominado pelo campo magnético deste designa-se por *magnetosfera*. Quando o vento solar entra na magnetosfera as suas partículas são desaceleradas para velocidades subsónicas.

Para além da magnetosfera existe uma outra camada chamada *magnetopausa* para a qual a pressão exercida pelo vento solar iguala a pressão exercida pelo campo magnético da Terra. Se as partículas do vento solar tiverem energia suficiente para atravessar a magnetopausa então elas acabam por ficar aprisionadas nas chamadas *Cinturas de Van Allen*. Estas cinturas consistem em dois anéis em torno da Terra: 2000-5000 km e 13000-19000 km. A interação do vento solar com as altas camadas da atmosfera dá origem às chamadas *auroras* que se podem observar perto dos polos da Terra.

2.4 Lua

A Lua tem rotação sincronizada com a Terra: dá uma volta completa sobre si própria no mesmo intervalo de tempo em que completa uma volta em torno da Terra (aprox 27.3 dias). Como consequência a Lua apresenta sempre a mesma face virada para a Terra.

Quando dizemos que a Terra descreve uma órbita elíptica em torno do Sol estamos a ser incorretos. Quem descreve essa órbita elíptica é centro de massa do sistema Terra-Lua. O centro de massa de um sistema é um ponto que se comporta como se toda a massa do sistema estivesse concentrada nesse ponto. Como a massa da Lua é apenas 1.23% da massa da Terra o centro de massa do sistema coincide quase com o centro da Terra.

O facto de a órbita da Lua em torno da Terra ser ligeiramente elíptica e do seu eixo de rotação estar ligeiramente inclinado em relação ao plano da órbita faz com que se consiga ver da Terra cerca de 60% da superfície da Lua e não apenas 50%: a esta oscilação que permite ver mais 10% da superfície da Lua chama-se *movimento de libração*.

2.4.1 Atmosfera e superfície da Lua

A Lua não tem atmosfera. Isto implica que não pode existir água no estado líquido na superfície da Lua pois não existe pressão atmosférica. Em 1994 a sonda *Clementine* descobriu água gelada no polo sul da Lua numa zona protegida da luz solar.

Na superfície da Lua podemos observar crateras, *mares* e *terras* (zonas altas). As crateras resultam de impactos de meteoritos e não de atividade vulcânica. De facto, nas grandes crateras lunares, existe um pico central característico de impactos a grande velocidade. Os *mares* são regiões onde existem menos crateras e, portanto, mais jovens. São zonas que foram inundadas

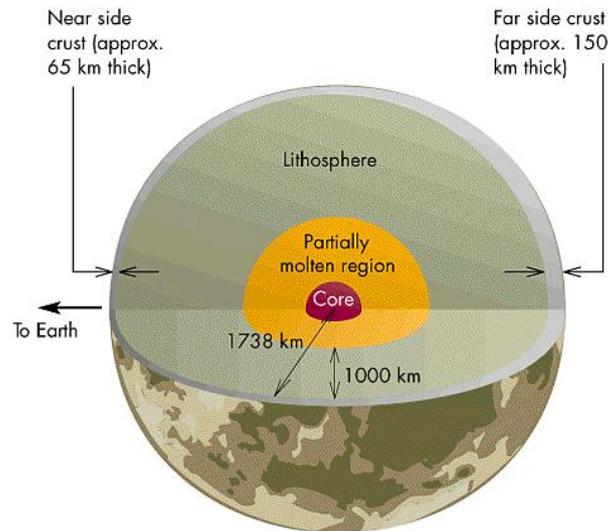


Figura 2: O interior da Lua [4].

por correntes de lava no passado. Os mares ocupam apenas 15% da superfície lunar.

2.4.2 Estrutura interna da Lua

A Lua não tem campo magnético no presente. No entanto, o estudo das rochas lunares revela que existiu um pequeno campo magnético no passado o que significa que a Lua já teve uma camada líquida no seu interior. A Lua tem um núcleo rico em ferro, parcialmente líquido, cujo diâmetro é de 700 km. Este núcleo corresponde a cerca de 2% da massa total da Lua. A crosta tem 60 km de espessura. Na Lua não existem placas tectónicas. Os sismos registados têm origem nas forças de maré exercidas pela Terra (Figura 2).

3 Mercúrio

Mercúrio, na sua fase mais brilhante, é um dos objetos mais luminosos do céu (reflete cerca de 12% da luz recebida do Sol, ou seja tem de *albedo* 0.12). No entanto, o facto de ser relativamente pequeno e estar muito perto do Sol (0.387 UA; 57.9 milhões de km) dificulta a sua observação a partir da Terra. A observação de Mercúrio é mais fácil quando este está na sua **elongação máxima** o que nunca ultrapassa os 28° acima da linha do horizonte. Para além disso Mercúrio está, no máximo, visível apenas duas horas antes do nascer do Sol ou duas horas antes do pôr do Sol.

Em 1962 foram detetadas ondas de rádio emitidas por Mercúrio permitiu determinar a sua temperatura. Em 1965 foram enviadas ondas de radar para Mercúrio que, ao serem refletidas de volta para a Terra, permitiram determinar o período de rotação do planeta (efeito Doppler). Apenas em 1974 o planeta pôde ser observado de perto quando a sonda *Mariner 10* o visitou fazendo três passagens (*fly-by*) pelo planeta (uma delas a apenas 300 km da superfície). Ficamos assim a saber que o seu período orbital é de 88 dias terrestres, que o período de rotação é de



Figura 3: Aspeto da superfície de Mercúrio. A foto foi tirada pela sonda Mariner 10 a uma altitude de 55000 km. Podemos ver diversas crateras rodeadas por zonas planas e extensas [5].

58.6 dias e que a sua temperatura superficial é de $\approx 100\text{ K}$ na face escura e de $\approx 700\text{ K}$ na face iluminada. Esta grande diferença entre temperaturas diz-nos que não existe no planeta uma boa condução de calor (via atmosfera ou via solo) entre as faces escura e iluminada.

Em 2004 foi lançada com destino a Mercúrio a sonda *Messenger*, a qual depois de efetuar três passagens pelo planeta, entrou na órbita deste em 2011.

3.1 Superfície de Mercúrio

Tanto a Lua como Mercúrio apresentam uma superfície repleta de crateras. Estas devem-se ter formado nos 700 milhões seguintes à formação do Sistema Solar. As crateras da Lua parecem, no entanto, muito mais concentradas do que as de Mercúrio. Existem entre as crateras zonas planas (que provavelmente foram cobertas por lava) com extensões da ordem dos $\sim 100\text{ km}$ (Figura 3). Estas zonas aparentam ser mais velhas do que os mares lunares e são também menos ricas em ferro o que pode explicar o facto de serem também mais claras.

Rodeando as referidas planícies existem escarpas com 20 a 500 km de comprimento e com até 3 km de altura. Estas devem-se ter formado quando o planeta arrefeceu e se contraiu. Como não existem sinais do derrame de lava junto das escarpas podemos concluir que a sua formação ocorreu numa fase tardia da formação do planeta, quando o seu interior já estava solidificado. A crosta de Mercúrio parece ser composta, como no caso da Lua, por uma única placa tectónica.

Uma das crateras mais proeminentes na superfície de Mercúrio é *Caloris Basin* (diâmetro $\approx 1300\text{ km}$). Esta cratera é relativamente jovem em relação às restantes uma vez que não se encontra ainda salpicada por crateras menores. O impacto meteórico que deu origem a Caloris Basin foi tão violento que deixou marcas do lado oposto de Mercúrio. A Mariner 10 detetou uma vasta zona formada por montes do lado oposto à cratera. Estes montes podem ter-se formado quando as ondas sísmicas do impacto se focaram nessa região depois de atravessarem o

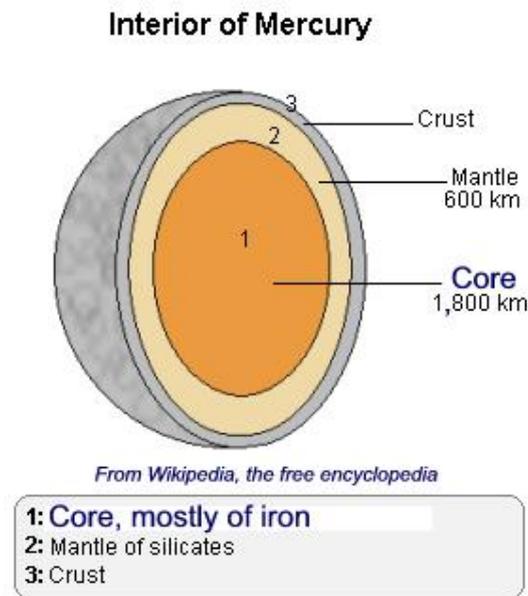


Figura 4: Esquema mostrando a estrutura interna do planeta Mercúrio. O núcleo de ferro do planeta destaca-se claramente pela sua dimensão [6].

interior do planeta.

3.2 O interior de Mercúrio

Mercúrio tem um núcleo rico em ferro como a Terra. No caso de Mercúrio o núcleo ocupa 42% do volume do planeta (correspondendo a cerca de 70% da massa total) fazendo de Mercúrio um dos corpos mais ricos em ferro no Sistema Solar (Figura 4). Existem várias teorias que procuram explicar a origem desse núcleo de ferro mas nenhuma delas é conclusiva.

Os aparelhos da Mariner 10 detetaram a existência de um campo magnético global em Mercúrio (cerca de 100 vezes inferior ao terrestre). Um resultado completamente inesperado pois para termos um campo magnético implica que deve existir material líquido no interior do planeta capaz de movimentar cargas elétricas. Para além disso a velocidade de rotação do planeta tem de ser relativamente elevada o que não é o caso. Mercúrio apresenta, assim, uma magnetosfera que interage com o vento solar embora de uma forma diferente à que acontece na Terra. De facto, Mercúrio não consegue aprisionar as partículas do vento solar. Apenas as consegue desviar.

3.3 Atmosfera de Mercúrio

O planeta apresenta uma atmosfera muito ténue composta por 98% de hélio e 2% de hidrogénio. Como Mercúrio não tem gravidade suficiente para sustentar uma atmosfera duradoura deve haver um sistema de reposição destes elementos. O mais provável é que tenham origem no vento solar ou nalgum processo de decaimento radioativo. A pressão ao nível do solo é $\approx 10^{-15}$ atm.

4 Vénus

Vénus é por vezes o objeto mais brilhante no céu noturno (albedo de 0.59) sendo muitas vezes designado por estrela da manhã ou estrela da tarde consoante o período do dia em que está visível. Na sua elongação máxima Vénus atinge 47° acima da linha do horizonte.

Vénus foi durante muito tempo um planeta misterioso. É muito semelhante à Terra em termos de massa e tamanho mas está sempre coberto por uma espessa camada de nuvens. Durante muitos anos especulou-se sobre a hipótese de Vénus esconder por debaixo desse manto de nuvens um ambiente repleto de vida. Esta questão só ficou devidamente esclarecida com as primeiras sondas enviadas para a órbita do planeta ou mesmo para a sua superfície. A primeira nave a passar por Vénus, a pouco mais de 34000 km da superfície foi a *Mariner 2* em 1962.

4.1 A rotação de Vénus

Vénus roda no sentido retrógrado (sentido oposto ao do movimento orbital) sendo o seu período de rotação de 243.01 dias o que é superior ao período orbital que é de 224.7 dias. Isto significa que em Vénus um dia é maior do que um ano. Devido ao seu movimento de rotação no sentido retrógrado, em Vénus o Sol e as estrelas deslocam-se de oeste para este. Não sabemos a razão pela qual Vénus roda no sentido retrógrado. Sabemos, todavia, ser um ponto importante para entendermos a formação e dinâmica do Sistema Solar. As primeiras medições relativas à rotação do planeta foram feitas nos anos 60 do século XX, a partir da Terra, com recurso a radar. Vénus não tem campo magnético, provavelmente, devido à sua rotação ser muito lenta.

4.2 A atmosfera de Vénus e a cobertura de nuvens

Os dados enviados pela pioneira *Mariner 2* permitiram concluir que a temperatura na superfície de Vénus é superior a 400°C . Isto exclui a possibilidade de existência de água no estado líquido na superfície ou de vapor de água na atmosfera do planeta. A sonda *Venera 7* desceu à superfície do planeta em 1970 tendo registado uma temperatura de 460°C , uma pressão equivalente a 90 atmosferas e uma densidade do ar cerca de 50 vezes superior à verificada na Terra ao nível do mar.

A atmosfera é composta por 96.5% de CO_2 (na Terra temos apenas 1% de CO_2) e 3.5% de N_2 . A enorme quantidade de CO_2 causa um forte efeito de estufa contribuindo para que a temperatura à superfície do planeta seja sempre de 460°C dia e noite e independentemente do local.

As nuvens venusianas definem três camadas distintas: 48-52 km, 52-58 km e 58-68 km. As camadas mais baixas são mais opacas e mais densas. Acima da camada mais externa e abaixo da camada mais interior existem camadas de neblina. Entre a camada de neblina mais inferior e o solo (últimos 30 km) a atmosfera é limpa (Figura 5).

O enxofre é um elemento abundante na atmosfera de Vénus. Este aparece em compostos como SO_2 , H_2S e H_2SO_4 . As nuvens de Vénus são compostas por ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado. Quando chove as gotas ácidas não conseguem atingir o solo pois, dada a alta temperatura, estas evaporam em plena queda e voltam a subir.

As altas camadas da atmosfera rodam em torno de Vénus em apenas 4 dias o que contrasta com a lenta rotação do planeta. Os gases presentes na atmosfera de Vénus são aquecidos pelo Sol

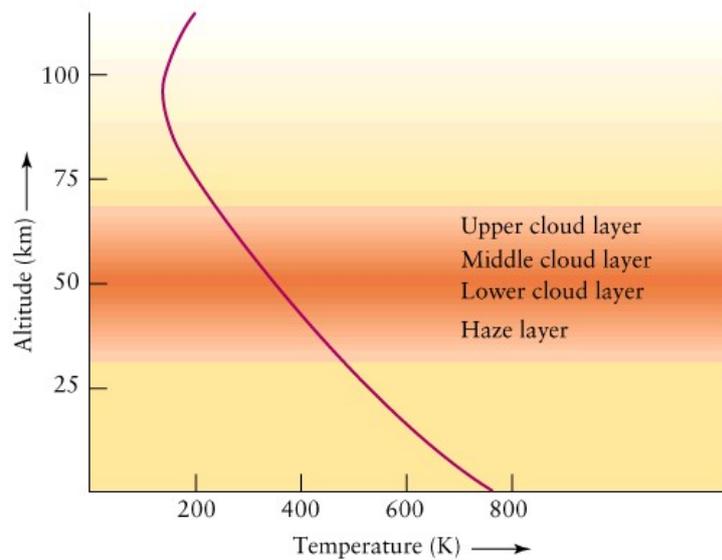


Figura 5: As diferentes camadas de nuvens na atmosfera de Vénus e a variação da temperatura com a altitude [7].

principalmente na zona do equador. Decorre depois um processo de convexão que leva este calor para os polos. Em Vénus, dada a sua lenta rotação, existem apenas duas células de convexão, uma para cada hemisfério (na Terra existem seis ao todo). Na Terra a rotação, mais alta, é capaz de distorcer e dividir as células de convexão. A rotação de Vénus, mais baixa, consegue apenas arrastar as células de convexão formando uma espécie de *Y* (Figura 6).

Nas altas camadas da atmosfera de Vénus os ventos atingem os 350 km/h ao passo que junto ao solo, devido à fricção entre a atmosfera e a superfície (tal como acontece na Terra), rondam apenas os 5 km/h. Embora o planeta não tenha campo magnético para desviar as partículas do vento solar, esse papel acaba por ser, de certa forma, desempenhado pelos iões existentes nas altas camadas da atmosfera.

4.3 Atividade vulcânica

O facto de a atmosfera de Vénus ser rica em SO_2 (e outros derivados do enxofre) é uma consequência da atividade vulcânica registada no planeta. Em 1990 a sonda *Magalhães* detetou cerca de 1600 vulcões e diversas correntes de lava (Figura 7). A maior parte destes vulcões está inativa no presente. Foram, no entanto, detetados fluxos de lava recentes com idade inferior a 10 milhões de anos. De acordo com os dados enviados pela *Venera 13* e outras sondas que desceram à superfície o solo venusiano é composto por rochas basálticas (origem vulcânica).

Na Terra, compostos como SO_2 , H_2O e CO_2 , libertados pelos vulcões, acabam por se dissolver nos oceanos, sendo mais tarde incorporados em rochas sedimentares. No caso de Vénus, como não existem oceanos, não ocorre essa reciclagem, pelo que o SO_2 e o CO_2 acabam por ficar na atmosfera (as moléculas de H_2O são separados por radiação UV proveniente do Sol).



Figura 6: Vénus fotografado em UV pela sonda *Pioneer Venus* em 1979. Consegue-se ver nitidamente a forma de Y provavelmente devida ao arrastamento das células de convecção [8].

4.4 Interior de Vénus

O interior do planeta é formado por um núcleo metálico muito provavelmente semelhante ao da Terra. O núcleo é rodeado por um manto de rocha fundida. Finalmente temos uma crosta rochosa. Embora apresente bastantes sinais de vulcanismo Vénus é composto por uma única placa tectónica.

4.5 Superfície de Vénus

O mapa superficial de Vénus, obtido pelo radar da sonda Magalhães, mostra um relevo bastante suave com apenas 5% da superfície a se desviar mais do que 2 km do seu raio médio. Destacam-se duas zonas no planeta: *Terra de Ishta* no hemisfério norte (onde se destacam os *Montes Maxwell* com 12 km de altura) e a *Terra de Afrodite* no hemisfério sul.

Vénus apresenta cerca de 100 crateras com dimensão superior a 1 km (muito mais do que foi encontrado na Terra mas muito menos do que existe em Mercúrio ou em Marte). A distribuição destas crateras é mais ou menos uniforme pelo que se julga que a superfície do planeta tem mais ou menos a mesma idade a qual está avaliada em 500 milhões de anos.

5 Marte

Observações feitas a partir da Terra, desde o século XVII, permitiram concluir que o período de rotação de Marte é semelhante ao da Terra, que o seu eixo de rotação está inclinado cerca de 25° em relação ao plano da órbita (o que sugere a existência de estações como na Terra) e que existem calotes polares que aumentam e diminuem de tamanho consoante as estações.

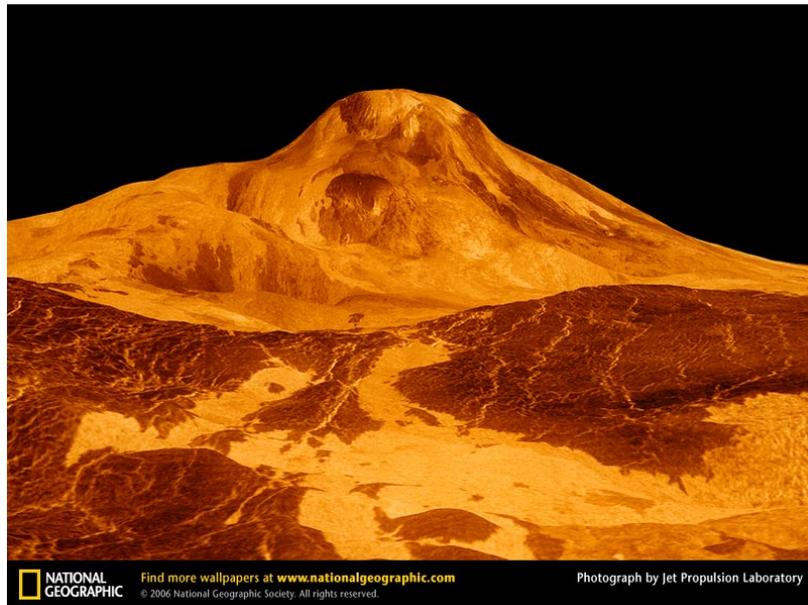


Figura 7: Maat Mons: um monte de origem vulcânica em Vénus fotografado pela sonda *Magalhães* [9].

A observação de algumas estruturas na superfície marciana (erradamente traduzidas do italiano para *canais*) levou mesmo à especulação sobre a existência de vida inteligente em Marte. Os canais eram vistos como condutas que levavam água das zonas polares para as zonas equatoriais. A alteração da coloração da superfície era interpretada como um coberto vegetal em desenvolvimento. Entre 1964 e 1967 passaram por Marte as sondas Mariner 4, 6 e 7. Nas imagens e dados enviados não existem quaisquer evidências de canais ou de vegetação. Desde então foram enviadas dezenas de missões para Marte (sistemas orbitais, sistemas de descida, rovers) – ver [10].

5.1 Superfície Marciana

A superfície de Marte está coberta de crateras resultantes de impactos de meteoritos. Algumas delas são relativamente grandes. As crateras são mais abundantes no Hemisfério Sul o que significa que a superfície do Hemisfério Norte foi alvo de um processo de rejuvenescimento. No Hemisfério Sul a superfície eleva-se, em geral, 5 km acima do que acontece no Hemisfério Norte pelo que os dois hemisférios são designados, respetivamente, por *Terras Altas* e *Terras Baixas* (Figura 8).

Existem diversos vulcões inativos em Marte. O maior deles (e o maior conhecido no Sistema Solar) com 24 km de altura e uma base com 600 km de diâmetro é *Olympus Mons* (Figura 9). Este está rodeado por escarpas de 6 km de altura. Perto deste monte existe uma cadeia de montanhas vulcânicas designada por faixa de *Tharsis*. No lado oposto do planeta existe uma montanha vulcânica de menores dimensões designada por *Elysium Mons*.

A este da região de Tharsis existe um grande desfiladeiro, paralelo ao equador, designado por *Valles Marineris* (Figura 10). A extensão de Valles Marineris atinge os 4000 km e sua profundidade chega, nalgumas partes, aos 7 km. Este desfiladeiro deve ter-se formado em resultado de uma fratura na crosta do planeta talvez quando a atividade vulcânica estava no seu auge. Na

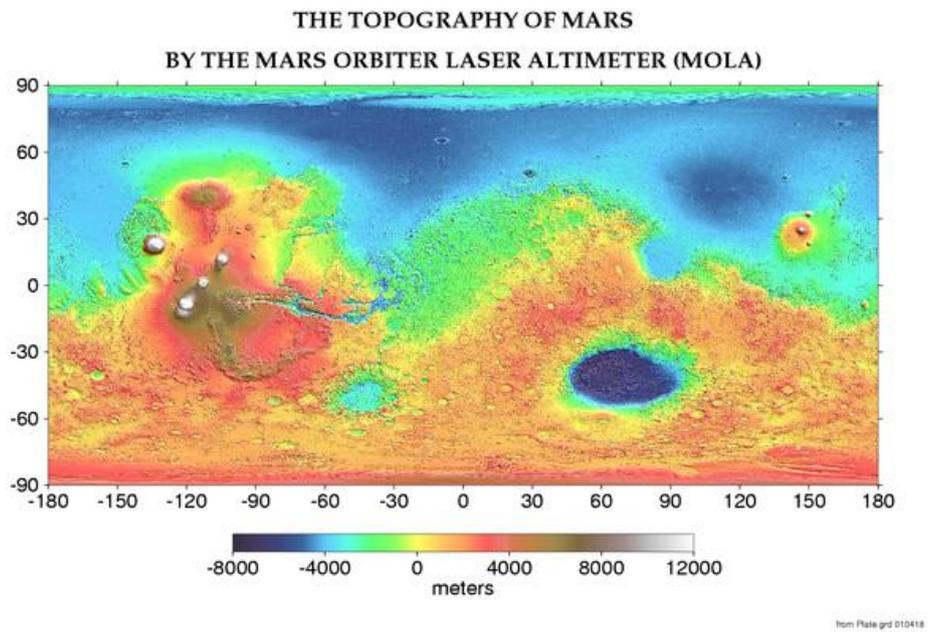


Figura 8: Relevo do planeta Marte. No hemisfério sul a superfície eleva-se, em geral, 5 km acima do que acontece no hemisfério norte. Por esse motivo o hemisfério norte é muitas vezes designado por *Terras Baixas* e o hemisfério sul por *Terras Altas* [11].

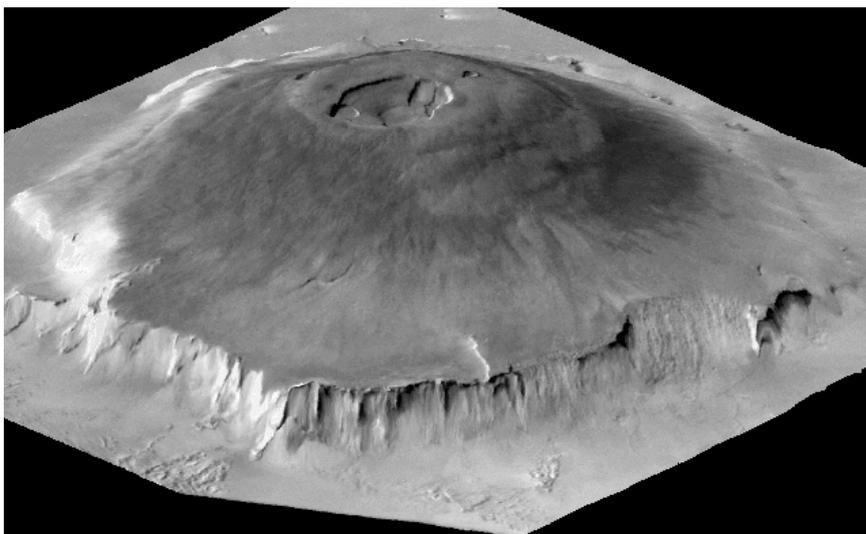


Figura 9: Imagem 3D de *Olympus Mons*, a maior montanha vulcânica conhecida no Sistema Solar [12].



Figura 10: *Valles Marineris*: um grande desfiladeiro em Marte [13].

mesma região encontramos desfiladeiros mais pequenos.

Em Marte existe uma única placa tectónica. Por isso mesmo existe apenas um grande vulcão (Olympus Mons). Na Terra o movimento das placas desloca os montes vulcânicos dando lugar à formação de novas montanhas (como acontece, por exemplo, nas ilhas do Havai). Em Marte, não existindo esse deslocamento, assistimos ao avolumar de uma única montanha.

A superfície do planeta está em geral coberta de poeira formando dunas em alguns locais. São comuns as tempestades de poeira. Por vezes estas assumem um carácter global envolvendo todo o planeta. Devido à magnetite existente na poeira o céu marciano apresenta um aspeto amarelado. O solo marciano é rico em ferro, enxofre e silício.

Um dos objetivos das sondas Viking 1 e 2, que desceram em Marte em 1976 (de facto as primeiras a descerem no planeta), era o de procurar vestígios da eventual existência de vida. Embora tenham sido registados alguns processos químicos interessantes não foi encontrada qualquer pista conclusiva que suporte a existência de vida – ver [10].

5.2 Interior de Marte

O núcleo de Marte deve estender-se até aos 0.5 raios marcianos. Esse núcleo deve ser rico em enxofre e suficientemente quente para que esteja derretido (a massa do planeta é suficiente para tal). As propriedades elétricas do enxofre diferem das do ferro pelo que, no caso de Marte, não temos um campo magnético global como na Terra. Existem, no entanto, regiões fracamente magnetizadas no hemisfério sul do planeta o que sugere que em tempos pode ter existido um campo magnético.

5.3 Atmosfera Marciana

A atmosfera de Marte é muito ténue se comparada com a da Terra. A pressão na superfície ronda as 0.0063 atmosferas (o mesmo que na Terra à altitude de 35 km). É composta por 95.3% de CO_2 , 2.7% de N_2 e vestígios de árgon, oxigénio, monóxido de carbono e vapor de água. Formam-se algumas nuvens compostas por cristais de vapor de água e de CO_2 . No entanto, nunca chove em Marte.

Os gases presentes na atmosfera de Marte são os necessários para que ocorra o efeito de estufa.



Figura 11: Um *dust devil* fotografado em Marte pelo rover da sonda Spirit [14].

No entanto como a atmosfera é ténue o efeito não é muito acentuado, aumentando a temperatura em apenas 5 °C. Na Terra o CO_2 libertado pelos vulcões acabou por se dissolver nos oceanos ou por ficar aprisionado nos sedimentos. Em Marte isso não aconteceu e por isso a atmosfera continua a ser composta maioritariamente por CO_2 .

Durante um dia marciano a temperatura pode variar entre -76 °C e -10 °C como registou a *Mars Pathfinder* que chegou a Marte em 1997. Todas as tardes formam-se *diabos de poeira* (dust devils) como nos desertos da Terra (Figura 11). Em Marte, dada a menor gravidade, estes chegam a atingir os 6 km de altitude. Durante o inverno forma-se neve carbónica (CO_2) fazendo com que a pressão atmosférica baixe. No verão volta tudo ao estado inicial.

5.4 Água em Marte

Existem diversos indícios na superfície marciana que apontam para a existência de água corrente no passado, especialmente no Hemisfério Sul. Existem canais fluviais (Figura 12), crateras com o fundo plano (depósito de sedimentos), sinais de erosão provocados por água corrente e vestígios de inundações repentinas (Figura 13). Isso deve ter acontecido, todavia, num passado remoto do planeta uma vez que essas estruturas apresentam já bastantes crateras sem sinais de erosão significativa.

A água no estado líquido pode existir mediante pressão e temperatura adequadas. A combinação destes valores no Marte atual apenas possibilita a existência de água no estado sólido ou no estado vapor (como nos congeladores dos frigoríficos). A existência de água líquida no passado implica que a atmosfera do planeta era então mais densa e mais quente.

Para onde foi a água marciana? Na atmosfera não está. Pode estar nas calotes polares. Sabemos, no entanto, que as calotes polares não podem ser apenas água gelada. A temperatura no inverno marciano desce ao ponto de possibilitar a congelação do CO_2 e, portanto, parte do gelo é também CO_2 . Com a chegada da primavera as calotes polares recuam. A sonda *Mariner 9* em 1972 registou o recuo da calote polar norte. No entanto, com a chegada do verão o recuo deteve-se

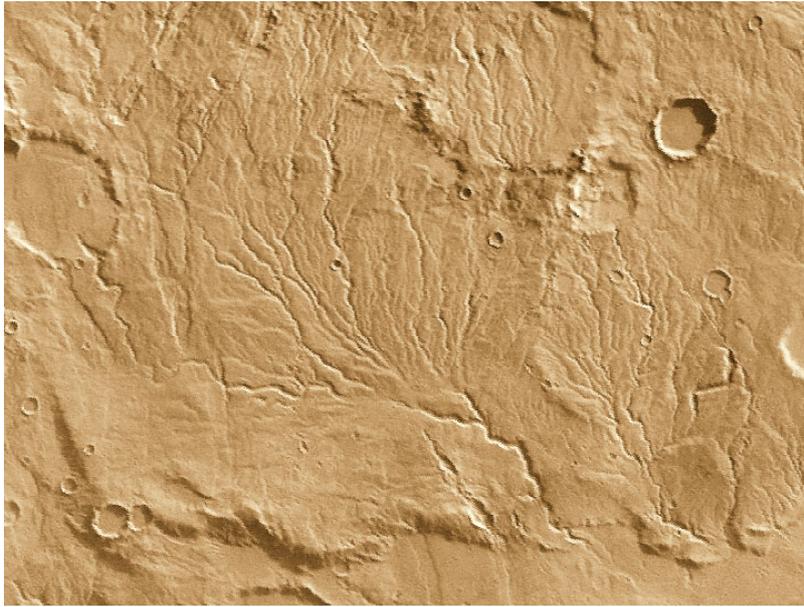


Figura 12: Canais fluviais onde se julga ter existido água corrente em Marte. A imagem é muito semelhante à dos canais fluviais secos observados em desertos na Terra [15].

abruptamente ficando uma calote polar residual (correspondendo talvez à água). A existência de água gelada foi finalmente confirmada em 2004 pela *Mars Express*.

Existem indícios da existência de água não só nos polos mas também noutras regiões. Neste caso a água está gelada no subsolo. Existem sinais de que emergiu água do subsolo no momento da formação de algumas crateras. Existem também potenciais vestígios de água corrente relativamente recentes (Figura 14).

5.5 Luas marcianas

Marte tem duas pequenas luas de forma irregular e com bastantes crateras: *Phobos* e *Deimos*. Não é conhecida a origem destas luas. Podem tratar-se de antigos asteroides capturados por Marte ou então podem ter-se formado juntamente com Marte. *Phobos* aproxima-se gradualmente de Marte devendo colidir com este daqui por cerca de 40 milhões de anos. Por seu turno *Deimos* afasta-se gradualmente de Marte.

6 Júpiter

Júpiter é o maior planeta do Sistema Solar. A melhor altura para observar Júpiter é quando este se encontra em oposição. Nessa situação, que ocorre a cada 13 meses, é cerca de 3 vezes mais brilhante do que Sírius e ocupa no céu 50 arcsec. O período orbital é de 11.86 anos pelo que Júpiter percorre cada uma das constelações do Zodíaco em aproximadamente um ano.



Figura 13: *Ilhas marcianas* resultantes de uma grande inundação no passado remoto do planeta. Nota-se claramente a direção tomada pela água [7].

6.1 Atmosfera de Júpiter

Júpiter é o planeta que apresenta o movimento de rotação mais rápido em todo o Sistema Solar. A rápida rotação leva ao aparecimento de fenómenos atmosféricos como sejam as *bandas* e as *manchas*. De facto, Júpiter apresenta bandas coloridas paralelas ao equador alternadamente escuras (chamadas cinturas) e claras (chamadas zonas). Predominam os tons de vermelho, laranja, castanho e amarelo (Figura 15). As zonas parecem ser formadas por gás quente a subir ao passo que as cinturas (com um desnível de cerca de 20 km em relação às zonas) parecem ser formadas por gás frio a descer.

Provavelmente uma das características mais marcantes de Júpiter é a sua *Grande Mancha Vermelha* situada no hemisfério sul do planeta (Figura 15 e 16). Foi observada pela primeira vez em 1644 por Robert Hooke mas pode ser muito mais antiga. Trata-se de uma tempestade persistente na dinâmica atmosfera do planeta. Têm sido observadas outras tempestades cuja duração é da ordem das semanas ou meses.

A Grande Mancha Vermelha é uma tempestade persistente, mas não é estática. Entre as passagens das sondas Pioneer (1973 e 1974) e as Voyager (1979) foram detetadas alterações em torno dos contornos da mancha. Para além disso ao longo dos últimos 300 anos têm-se verificado variações no tamanho da mancha (desde 1 a 3 raios terrestres na sua maior extensão). A mancha é formada por nuvens de grande altitude e por uma camada mais inferior de nuvens cerca de 50 km abaixo. Roda no sentido anti-horário com um período de aproximadamente 6 dias. No lado norte da mancha os ventos sopram para oeste ao passo que no lado sul sopram no sentido contrário. Um fenómeno semelhante na Terra tenderia a modificar-se e a dissipar-se ao interagir com os oceanos ou com as massas continentais. O facto de isso não ser possível em Júpiter pode explicar a grande longevidade desta tempestade.

Outro fenómeno observado na atmosfera de Júpiter são as designadas *ovais brancas* (ver Figura 16). Estas têm características semelhantes à da Grande Mancha Vermelha entre as quais

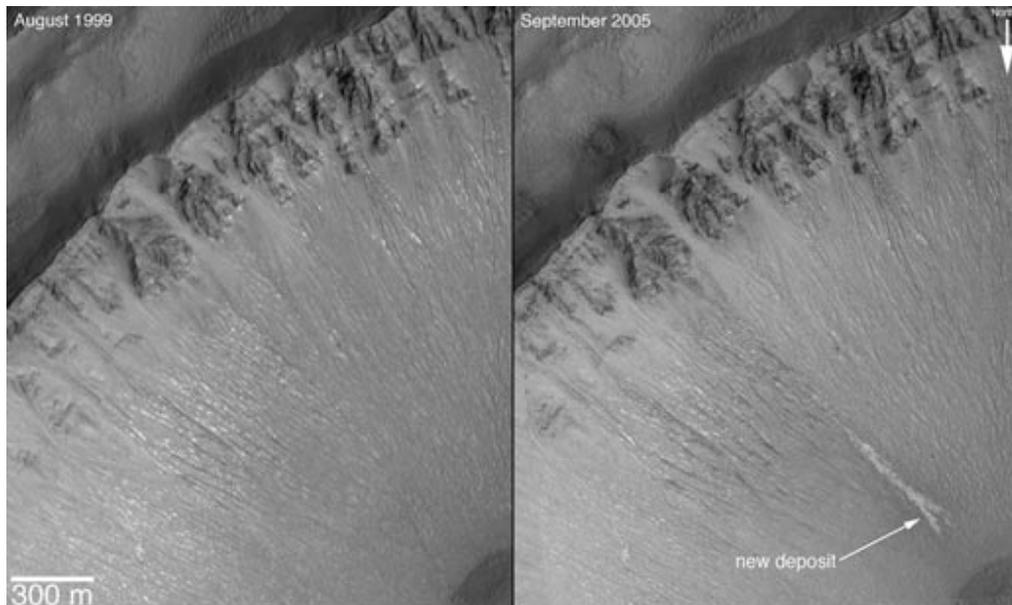


Figura 14: Imagens do mesmo local captadas em 1999 e em 2005. Na imagem mais recente pode observar-se um depósito de material que antes não existia. Isto poderá ser um indício de água corrente que tenha brotado do subsolo marciano [16].

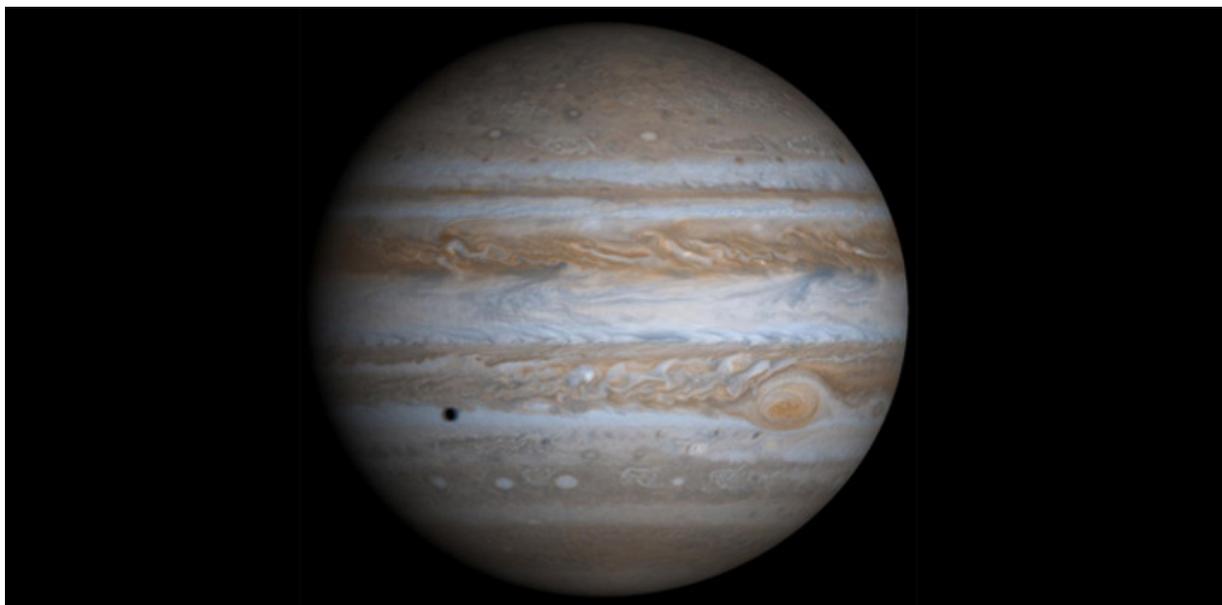


Figura 15: Imagem de Júpiter obtida pela sonda *Cassini* a caminho de Saturno. Podemos ver bem a Mancha Vermelha e as bandas paralelas ao equador. A pequena sombra sobre o disco do planeta é provocada pela lua Europa. [17].

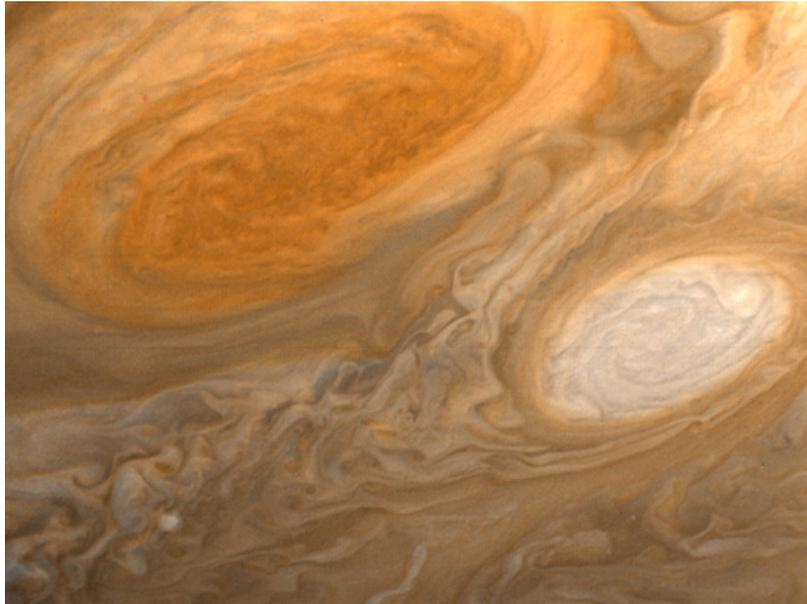


Figura 16: Imagem da Grande Mancha Vermelha obtida pela Voyager 1 em 1979. Na imagem é também visível uma oval branca [18].

alguma longevidade (estão no mesmo local desde que foram observadas em 1938). Aparecem sobretudo no hemisfério sul. No hemisfério norte são mais comuns as *ovais castanhas*. Os estudos revelam que as ovas castanhas são buracos na atmosfera ao passo que as ovas brancas são zonas onde existem nuvens altas.

A velocidade do vento pode exceder os 500 km/h. Os ventos alteram de direção entre *zonas e cinturas*. Em Júpiter existem cinco/seis correntes diferentes em cada hemisfério (na Terra temos apenas duas).

Existem 3 camadas de nuvens (Figura 17). Em 1995 a sonda Galileu penetrou 200 km na atmosfera de Júpiter até se desintegrar quando a pressão atingiu as 24 atm. Mesmo assim a sonda pode registar a ocorrência de trovoadas e ventos ainda mais fortes (650 km/h). A temperatura no topo das nuvens ronda os 125 K. A cada km de descida a temperatura aumenta em 2 K. Quanto à composição em massa da atmosfera temos 75% hidrogénio molecular, 24% hélio atómico (muito parecido com o Sol) e 1% para metano, amónio, vapor de água e outros gases.

6.2 Magnetosfera de Júpiter

A magnetosfera de Júpiter afeta o vento solar até a distância de 7 milhões de km, obrigando este a contornar o planeta. Do lado oposto ao Sol, a zona protegida do vento solar, chega aos 700 milhões de km cruzando mesmo a órbita de Saturno.

A região mais interna da magnetosfera consiste num plasma composto principalmente por prótons e eletrões, mas também por iões de He, S e O. A origem destas partículas é a lua Io, cuja órbita fica dentro da própria magnetosfera. Io é vulcânicamente bastante ativa, lançando a cada segundo toneladas de material para o espaço. Tal como na Terra podem formar-se auroras.

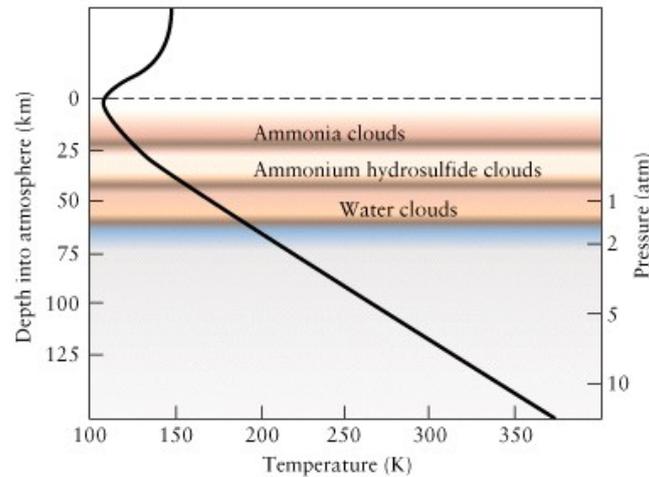


Figura 17: As diferentes camadas de nuvens na atmosfera de Júpiter e a variação da temperatura com a altitude [19].

6.3 Interior de Júpiter

Júpiter, não sendo um corpo rígido como os planetas rochosos, tem rotação diferencial. No equador o período de rotação é de 9h 50m 28s ao passo que perto dos polos é de 9h 55m 41s.

Embora Júpiter seja o planeta do Sistema Solar com maior massa (318 vezes a massa da Terra) a sua densidade é inferior à da Terra. O planeta é composto em grande parte por hidrogénio e hélio (71% hidrogénio molecular, 24% hélio atómico e 5% de elementos pesados). A parte mais exterior do planeta é composta por um envelope de H_2 e He. À medida que vamos descendo para o interior a temperatura e pressão aumentam fazendo com que o hidrogénio se torne primeiro líquido, e depois líquido metálico.

Júpiter emite cerca de duas vezes mais energia do que aquela que recebe do Sol. Essa energia emitida na banda do IV resulta da contração gravitacional do planeta. No interior do planeta está ainda armazenado, desde o tempo da sua formação, um excesso de energia potencial gravitacional que ainda não escapou completamente. Deve ser esta a fonte de energia responsável pela emissão observada em Júpiter.

Júpiter apresenta um achatamento nos polos de 6.5% em relação ao equador. Se não estivesse a rodar seria uma esfera praticamente perfeita. O achatamento não depende apenas da rotação mas também da forma como a massa do planeta está distribuída no seu interior. Assim estima-se que no centro exista um núcleo (equivalente a 4% da massa do planeta) rochoso ou composto ainda por hidrogénio metálico (talvez no estado sólido). A pressão no centro do planeta deve rondar os 70 milhões de atmosferas e a temperatura deve ser próxima de 22 000 °C. Entre zonas adjacentes existem camadas de transição (Figura 18).

O achatamento do planeta permite saber o tamanho do núcleo sólido mas não dá qualquer informação sobre o que existe entre a superfície e esse núcleo. Podemos, no entanto, obter informação sobre essa região a partir de observações na banda do rádio. De facto, Júpiter

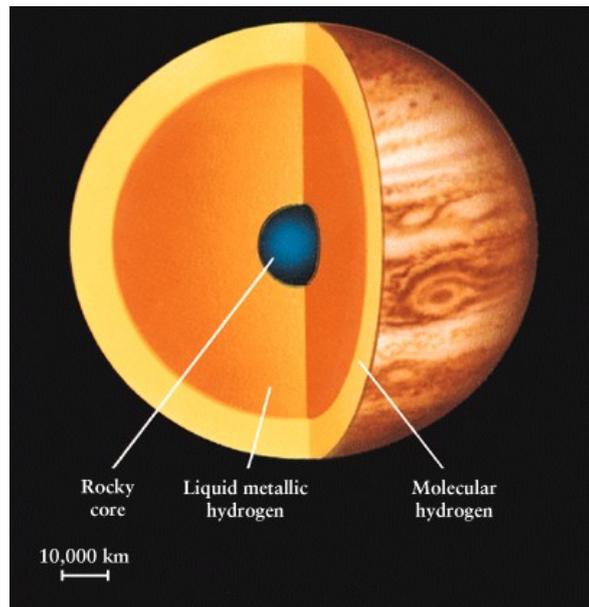


Figura 18: O interior do planeta Júpiter [19].

emite uma grande quantidade de energia na banda do rádio. Uma pequena parte dessa radiação é térmica (radiação do corpo negro) mas o grosso da radiação é não térmica (Figura 19), apresentando-se em dois comprimentos de onda específicos:

- 10 m (ondas decamétricas) - observam-se nesta banda explosões esporádicas provavelmente devidas a descargas elétricas na ionosfera do planeta. A ocorrência destas descargas é provocada pela passagem de Io, a lua mais interior de Júpiter;
- 10 cm (ondas decimétricas) - nesta banda é emitido um fluxo constante de radiação resultante do movimento, a velocidades relativistas, dos elétrons no campo magnético de Júpiter. Esta radiação é designada por *radiação de sincrotrão*.

A radiação de sincrotrão é um indicador claro da existência de um campo magnético. No caso de Júpiter o campo magnético é cerca de 14 vezes superior ao registado na Terra ao nível do equador. O campo magnético de Júpiter é provocado pelo movimento de cargas elétricas no seu interior. Neste caso trata-se de hidrogénio metálico no estado líquido o qual existe cerca de 700 km abaixo da superfície onde a pressão é suficiente para que o hidrogénio exista nesse estado. O campo magnético de Júpiter está inclinado cerca de 11° em relação ao eixo de rotação do planeta e tem a polaridade invertida se comparado com o da Terra.

6.4 Anéis de Júpiter

Em 1979 a Voyager 1 descobriu que Júpiter também tem um sistema de anéis. Estes são compostos por pequenas partículas de rocha com tamanhos da ordem de 1 micrómetro e refletem apenas 5% da luz recebida do Sol pelo que devem ser sobretudo rochosos e não compostos por gelo. Resultam provavelmente do impacto de meteoros nas pequenas quatro luas mais interiores de Júpiter (Amalthea, Thebe, Adrastea e Metis).

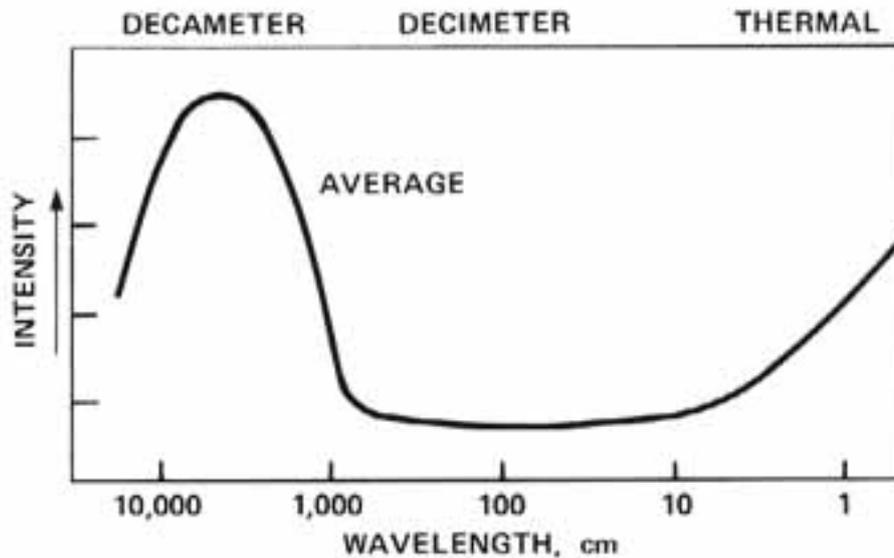


Figura 19: Júpiter emite ondas de rádio de três tipos: térmicas, decimétricas e decamétricas — ver texto para mais detalhes [20].

6.5 Satélites de Júpiter

Os 4 maiores satélites de Júpiter (Io, Europa, Ganimedes e Calisto) foram observados pela primeira vez em 1610 por Galileu. São, por isso, designados atualmente por satélites galileanos. A sua observação está ao alcance de qualquer pequeno telescópio. Só não são visíveis a olho nu pelo facto de estarem muito próximos de Júpiter (que é muito mais brilhante) e os nossos olhos não terem o poder de resolução necessário para os separar. Rodam relativamente rápido em torno de Júpiter pelo que em noites de observação sucessivas podem ser observados em configurações diferentes.

Estes quatro satélites apresentam sempre a mesma face voltada para Júpiter. A relação entre o período orbital de cada satélite e respetivo período rotacional é assim de 1:1. Curiosamente existe também uma relação de 1:2:4 entre os períodos orbitais de Io, Europa e Ganimedes: enquanto Ganimedes completa uma volta, Europa completa duas e Io completa quatro voltas em torno de Júpiter.

Daqui da Terra vemos o plano orbital dos satélites praticamente de frente pelo que são comuns os *trânsitos* (passagem de um satélite sobre o disco de Júpiter), as *ocultações* (satélite escondido por Júpiter) e os *eclipses* (o satélite embora não esteja escondido está na zona de sombra de Júpiter e por isso não pode ser visto).

6.5.1 Io

Tem uma densidade superior à da Lua pelo que deve ser essencialmente rochoso na sua composição. Das quatro luas galileanas, Io é a única que não tem vestígios da presença de água. Io é um corpo vulcânicamente ativo (ver Figura 20) pelo que a sua superfície está constantemente em renovação não apresentando, por isso, quaisquer sinais de crateras de impacto. O material expelido pelos vulcões, essencialmente enxofre e dióxido de enxofre, sobe a mais de 250 km de

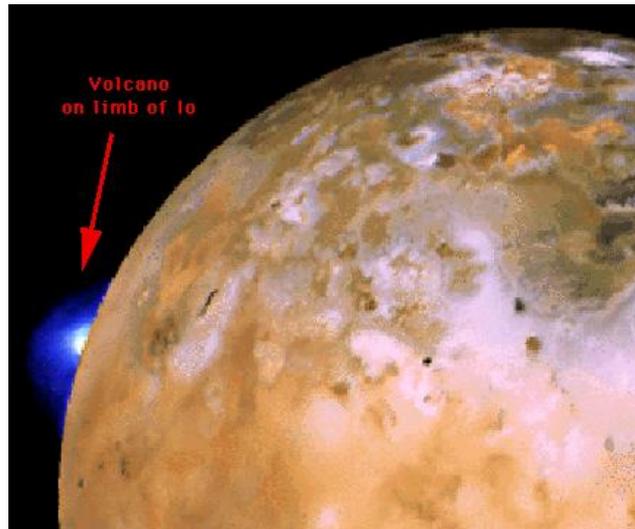


Figura 20: Erupção vulcânica em Io captada pela sonda Voyager 2. Trata-se da primeira imagem que mostrou um vulcão em plena atividade fora da Terra [22].



Figura 21: Da esquerda para a direita: Calisto, Ganimedes, Europa e Io (as quatro maiores luas de Júpiter) [21].

altitude. A maior parte deste material volta à superfície dando a Io a sua coloração característica (Figura 21). No entanto, como Io se encontra dentro da magnetosfera de Júpiter alguns iões expelidos acabam por ser capturados por iões presentes na magnetosfera formando-se assim uma espécie de toro em torno de Júpiter à distância da órbita de Io.

Com tantas cargas elétricas presentes e um campo magnético tão intenso acaba por estabelecer-se uma corrente elétrica intensa entre Júpiter e Io (400 000 Volt, 5 milhões de Ampere). Parte dessa corrente é devida ao movimento de eletrões. Estes acabam por emitir ondas de rádio na banda dos 10 m. O achatamento polar de Io revela que o seu núcleo rochoso, composto por ferro e sulfeto de ferro, tem um raio de 900 km.

6.5.2 Europa

Europa é o corpo mais liso e suave observado no Sistema Solar. O seu relevo não regista variações superiores a algumas centenas de metros. Praticamente não tem crateras (Figura 21). A sua

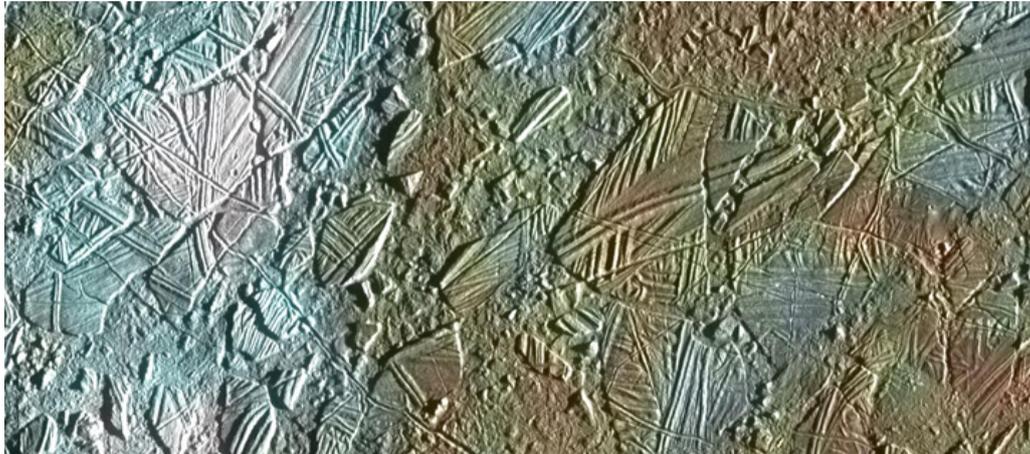


Figura 22: A crusta gelada de Europa [23].

superfície está coberta por um manto de água gelada bastante pura onde se podem observar um emaranhado de riscos ranhuras e fraturas (Figura 22). A água sobe à superfície através das fraturas (o que justifica a pureza da água) transportando consigo alguns minerais (o que justifica a coloração acastanhada de certas zonas).

Europa não tem calor interno que justifique a sua dinâmica. Esta deve-se às forças de maré impostas por Júpiter e também por Io e Ganimedes. Estas forças de maré não são suficientemente fortes para originar vulcanismo como em Io. A densidade de Europa é superior à da crusta terrestre pelo que esta lua deve ser essencialmente rochosa na sua composição, com a água a contribuir com apenas 10-15% para a massa total. O núcleo rochoso tem um raio de cerca de 600 km. A camada externa, com uma espessura de cerca de 200 km é composta por água no estado líquido e no estado sólido. Não se sabe ainda qual a fração de cada uma destas componentes.

Em Europa existe uma pequena atmosfera composta por O_2 (muito mais rarefeita do que os vácuos conseguidos nos laboratórios da Terra). As moléculas de O_2 formam-se quando iões da magnetosfera de Júpiter separam moléculas de água da superfície de Europa. No processo forma-se o H_2 que escapa para o espaço e O_2 , que tem mais dificuldade em escapar.

6.5.3 Ganimedes

Ganimedes é o maior satélite de Júpiter e do Sistema Solar sendo mesmo maior do que o planeta Mercúrio. A sua densidade é muito inferior à da Lua pelo que para além de uma parte rochosa deve ter na sua composição bastante água no estado sólido. Apresenta bastantes crateras sobre a sua superfície gelada. As crateras mais escuras são, regra geral, mais velhas do que as mais claras (Figura 21). A superfície é sulcada por extensas estrias (com centenas de km de extensão) e com profundidades de até 1 km. Também se observam longos e profundos sulcos (Figura 23). Tudo isto indica que no passado Ganimedes foi geologicamente bastante ativo.

Tem um núcleo metálico com cerca de 500 km de raio rodeado por um manto rochoso e uma camada externa de gelo. Tem um campo magnético (duas vezes superior ao de Mercúrio) o que indica que no seu interior devem existir cargas elétricas em movimento. Tem também uma ténue atmosfera composta por O_2 e O_3 .

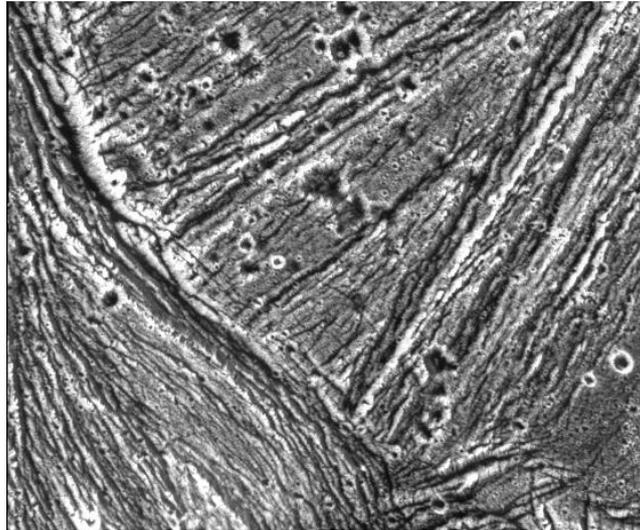


Figura 23: A superfície de Ganimedes com os seus longos e profundos sulcos [24].

6.5.4 Calisto

A sua densidade é muito inferior à da Lua pelo que para além de uma parte rochosa deve ter na sua composição bastante água no estado sólido. Apresenta bastantes crateras formadas no gelo embora tenha muito poucas com menos de 1 km de extensão o que significa que deve ter existido algum processo de erosão que fez desaparecer as crateras mais pequenas. A sua superfície parece coberta por um mineral bastante escuro cuja composição e origem ainda nos são desconhecidas (Figura 21). Tem um campo magnético e tem uma atmosfera ténue composta por CO_2 .

6.5.5 Outros satélites de Júpiter

Ao todo Júpiter tem mais de 60 satélites de pequenas dimensões (1 km a 270 km) na sua grande maioria com forma irregular. Quatro deles estão mais próximos de Júpiter do que Io. São eles Metis, Adrastea, Amalthea e Thebe. Amalthea tem uma cor avermelhada devido ao enxofre proveniente de Io. Todos os restantes satélites conhecidos estão mais distantes de Júpiter do que Calisto. Muitos deles têm orbitas em sentido retrógrado pelo que devem ser asteroides capturados por Júpiter.

7 Saturno

Saturno é o segundo maior planeta do Sistema Solar. A melhor altura para observar Saturno é quando este se encontra em oposição. Nessa situação, que ocorre a cada um ano e duas semanas, é um dos objetos mais brilhantes do céu noturno, embora não tão brilhante quanto Sírius. O período orbital é de 29.37 anos pelo que entre duas oposições consecutivas a Terra encontra Saturno quase na mesma posição. Saturno apresenta bandas coloridas paralelas ao equador mas não tão marcantes como as que se observam em Júpiter (Figura 24).

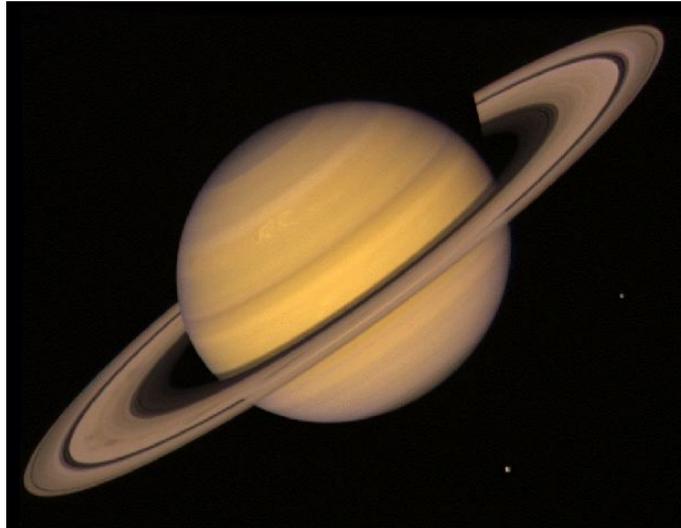


Figura 24: O planeta Saturno e o seu sistema de anéis fotografados pela sonda Voyager 2 em 21 de julho de 1981 [25].

7.1 Atmosfera de Saturno

A composição em massa da atmosfera de Saturno consiste em 92% de hidrogénio molecular, 6% de hélio atómico e 2% de outros gases. O facto da percentagem de hélio ser muito inferior à da atmosfera de Júpiter levanta um problema uma vez que, de acordo com o modelo de formação do Sistema Solar, os dois planetas devem ter-se formado na mesma época. Uma possível explicação tem a ver com o facto de Saturno ser mais pequeno. Nesse caso teria arrefecido mais rápido do que Júpiter e o hélio inicialmente existente na sua atmosfera terá caído mais rapidamente para o interior do planeta (análogo à precipitação do açúcar num chá mais frio...).

Têm sido observadas algumas tempestades na atmosfera de Saturno com duração da ordem das semanas ou meses mas nada que faça lembrar a Grande Mancha Vermelha de Júpiter. A velocidade do vento junto ao equador pode atingir valores da ordem dos 1800 km/h. Existem três camadas de nuvens como em Júpiter (Figura 25). A composição das nuvens é análoga à verificada em Júpiter, mas as altitudes a que ocorrem as diferentes camadas diferem (em Saturno estão menos comprimidas pois a gravidade é menor).

7.2 Magnetosfera de Saturno

A magnetosfera de Saturno é muito parecida com a de Júpiter embora seja mais pequena (10 a 20% apenas do tamanho da magnetosfera de Júpiter) e menos rica em partículas carregadas: os anéis de Saturno acabam por absorver essas partículas e, por outro lado, não existe uma lua como Io para as repor constantemente. Tal como na Terra podem formar-se auroras.

7.3 Interior de Saturno

Saturno, não sendo um corpo rígido (como os planetas rochosos) tem rotação diferencial. No equador o período de rotação é de 10h 13m 59s ao passo que perto dos polos é de 10h 39m 24s.

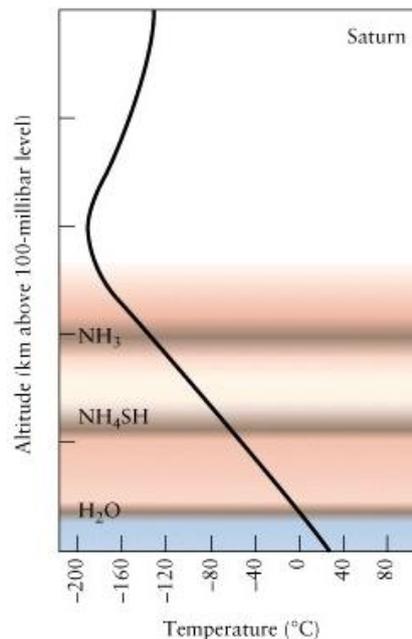


Figura 25: As diferentes camadas de nuvens na atmosfera de Saturno e a variação da temperatura com a altitude [19].

A densidade de Saturno é inferior à da Terra e até inferior à da água. O planeta é composto em grande parte por hidrogénio e hélio: 71% hidrogénio molecular, 24% hélio atómico e 5% de elementos pesados. Tal como Júpiter, Saturno também emite para o espaço mais energia do que aquela que recebe do Sol.

Saturno apresenta um achatamento nos polos de 9.8% em relação ao equador. Se não estivesse a rodar seria uma esfera quase perfeita. O achatamento não depende apenas da rotação mas também da forma como a massa do planeta está distribuída no seu interior. Estima-se que exista em Saturno um núcleo sólido com mais ou menos 10% da massa do planeta.

O achatamento do planeta permite saber o tamanho do núcleo sólido mas não dá qualquer informação sobre o que existe entre a superfície e esse núcleo. O campo magnético de Saturno atinge apenas cerca de 3% do de Júpiter. Isto significa que no interior de Saturno a quantidade de hidrogénio metálico no estado líquido deve ser bem menor (o que é de esperar pois a pressão é também inferior, dada a menor massa do planeta). Na Figura 26 é apresentado um esquema com a estrutura interna dos planetas Júpiter e Saturno.

7.4 Os anéis de Saturno

Saturno apresenta um amplo conjunto de anéis sem paralelo no Sistema Solar (Figura 24). Os anéis são compostos por partículas soltas. Se os anéis tivessem uma estrutura sólida seriam despedaçados pela gravidade de Saturno. As partículas devem ser essencialmente gelo pois os anéis são bastante brilhantes refletindo cerca de 80% da luz recebida do Sol, em contraste com a superfície de Saturno que reflete apenas 46% da luz recebida do Sol. O tamanho médio das partículas é de 10 cm embora se tenham observado aglomerados com até 5 m. A sua temperatura

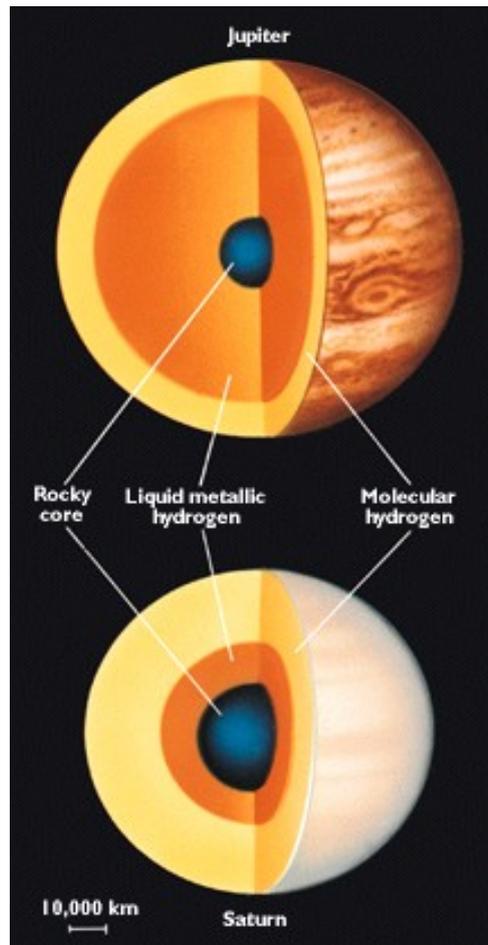


Figura 26: Comparação entre os interiores dos planetas Júpiter e Saturno [19].

varia entre os $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A origem destas partículas é desconhecida. Pode ter sido um satélite que nunca se chegou a formar ou então um que foi destruído pelas forças de maré provocadas pela proximidade de Saturno. A massa total que forma os anéis deve rondar os $10^{17} - 10^{19}$ kg. Juntando toda a matéria que forma os anéis obteríamos uma lua com um diâmetro máximo de 100 km.

Do ponto de vista de um observador terrestre a configuração do sistema de anéis altera-se, progressivamente, à medida que Saturno orbita em torno do Sol. Os anéis estão no plano do equador de Saturno e este tem o eixo de rotação inclinado cerca de 27° em relação ao seu plano orbital. Quando vistos de frente os anéis parecem desaparecer o que significa que são extremamente finos.

Os três anéis principais (mais brilhantes) são designados por A (mais exterior), B e C (mais interior) – ver Figura 24. O anel A tem de largura cerca de 20000 km e de espessura cerca de 200 m. Cerca de metade da luz incidente sobre o anel A é refletida. O anel B é ainda mais brilhante. A região que separa o anel A do anel B é designada por *divisão de Cassini*. As imagens enviadas pelas sondas mostram que os anéis A, B e C não são uniformes mas sim compostos por centenas e centenas de bandas ligeiramente afastadas umas das outras. Os diferentes anéis apresentam diferentes colorações pelo que podem ter tido origens diversas.

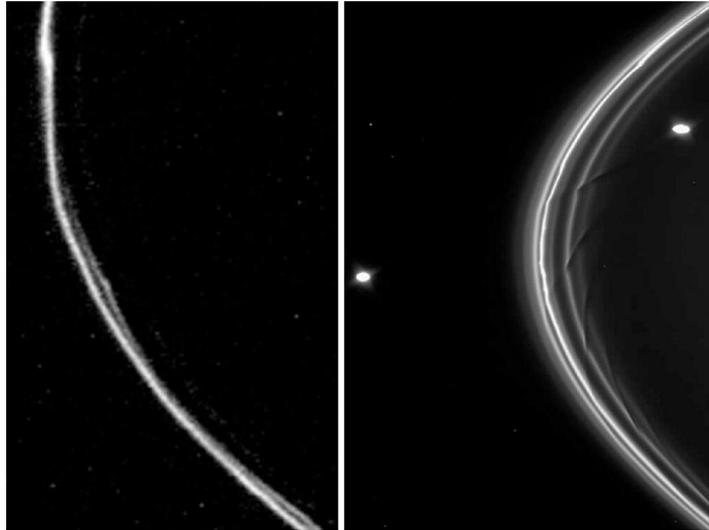


Figura 27: Imagem do anel F de Saturno obtida pela Voyager 1 a 12 novembro de 1980 (esquerda) e pela Cassini a 13 de abril de 2005 (direita). Na imagem da direita podemos ver Pandora (no exterior do anel) e Prometheus (no interior do anel) [26].

Os anéis mais exteriores são o G e o E. São muito pouco brilhantes. O anel E inclui a órbita de Enceladus o que pode justificar a presença de partículas de gelo uma vez que nessa lua existem *geysers* ativos.

A complexidade dos anéis está relacionada com a interação gravitacional entre as partículas que os formam e as luas mais próximas (efeito conjugado das diferentes atrações gravitacionais e das diferentes velocidades das luas e dos anéis). Temos como exemplo as luas Prometheus e Pandora que influenciam o anel F (descoberto pela Pioneer 11) dando a este um aspeto retorcido (Figura 27).

7.5 Titã

Titã é o único grande satélite de Saturno e o segundo maior do Sistema Solar logo a seguir a Ganimedes. Foi descoberto em 1665 por Christiaan Huygens. Titã é o único satélite do Sistema Solar onde existe uma atmosfera relativamente densa não deixando ver do exterior qualquer detalhe da sua superfície. A pressão ao nível da superfície (1.6 atm) é superior à verificada na Terra (1 atm ao nível do mar).

A temperatura varia entre os 93 K e os 150 K acima da cobertura de nuvens. Entre estes dois valores está o valor 90.7 K que corresponde ao ponto triplo do metano. A atmosfera é composta em cerca de 90% por N_2 , provavelmente provenientes do NH_3 (abundante no Sistema Solar exterior). A radiação UV do Sol separa estas moléculas em H_2 , o qual acaba por escapar por ser mais leve, e em N_2 que fica retido. O segundo gás mais abundante em Titã é o metano (CH_4). A radiação UV do Sol ao interagir com o metano produz uma vasta variedade de hidrocarbonetos mais complexos a começar pelo etano (C_2H_6). Este forma-se na atmosfera e acaba por se condensar caindo para a superfície.

A sonda Huygens separou-se da Cassini no dia de Natal de 2004 com o objetivo de descer à superfície de Titã o que aconteceu a 14 de janeiro de 2005. As primeiras imagens enviadas reve-

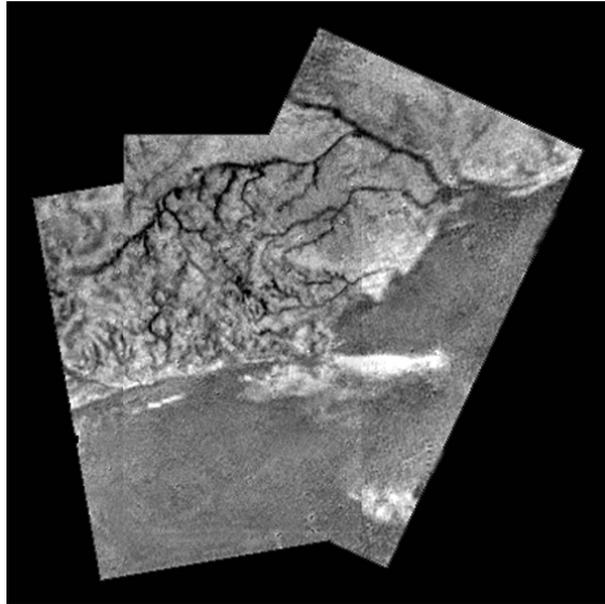


Figura 28: Algumas das primeiras imagens enviadas pela sonda Huygens diretamente da superfície de Titã [27].

laram um mundo extremamente parecido com a Terra em termos de geológicos e meteorológicos. Nas imagens podem ver-se rios com afluentes, ilhas, lagos e zonas costeiras (Figura 28). O fluido envolvido nestes processos é o metano.

7.6 Outros satélites de Saturno

Saturno tem cerca de 60 luas. Titã, com diâmetro de 5150 km, destaca-se claramente em termos de tamanho. Existem 10 luas (Rhea, Iapetus, Dione, Thetys, Enceladus, Mimas, Hyperion, Phoebe, Janus e Epimetheus) de tamanho moderado (100 a 1500 km de diâmetro) todas elas caracterizadas por baixas densidades. São corpos compostos sobretudo por gelo. A sua rotação está sincronizada com Saturno.

Enceladus tem uma albedo de 0.95 o que faz dele um dos corpos mais refletivos do Sistema Solar. Enceladus tem géiseres ativos cujas partículas, ao serem lançadas para o espaço, vão alimentar o anel E de Saturno. A atividade geológica de Enceladus deve ter a ver com a sua interação com a lua Dione uma vez que as órbitas dos dois corpos estão em ressonância de 1:2.

Mimas é caracterizado por uma grande cratera de impacto (para além de outras menores).

Tethys tem uma superfície cheia de crateras de impacto. Existe no entanto uma zona onde as crateras são mais espaçadas e onde parece ter havido um rejuvenescimento da superfície por correntes de lava.

Dione tem a face virada para Saturno repleta de crateras e a outra face essencialmente marcada por vales e gargantas profundas. Em Rhea acontece o mesmo cenário.

Iapetus é caracterizado pela grande variação de brilho que apresenta quando descreve a sua órbita. O lado voltado para Saturno é negro como o asfalto (albedo igual a 0.05) ao passo que o outro lado é muito brilhante (albedo igual a 0.50).

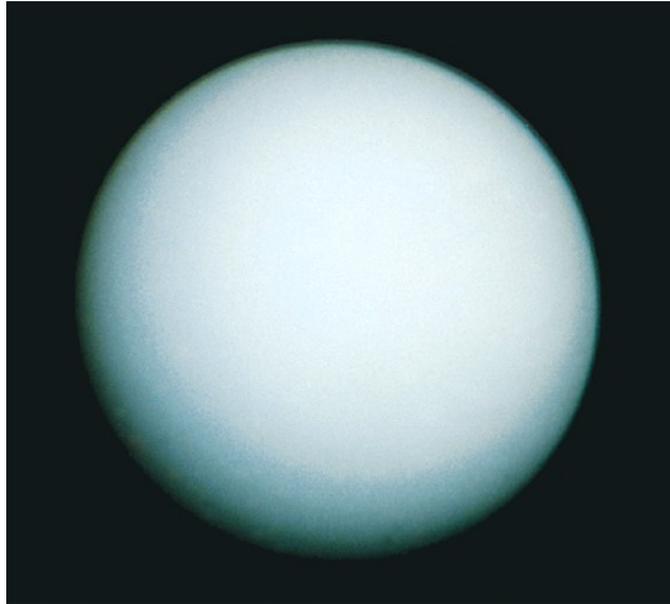


Figura 29: O planeta Úrano fotografado pela sonda Voyager 2 em 1986. O polo Sul do planeta está praticamente no centro da imagem [19].

As restantes luas (algumas dezenas) têm diâmetro entre um e 100 km. Algumas delas podem ter sido asteroides entretanto capturados por Saturno. Algumas das pequenas luas caracterizam-se também por varrerem a região junto aos anéis (casos de Pandora e Prometeus – ver Figura 27).

8 Úrano

Úrano está no limite do visível a olho nu pelo que, mesmo que tenha sido observado ao longo dos tempos, foi sempre visto como uma estrela pouco luminosa. Para além disso Úrano desloca-se apenas cerca de 4° por ano sobre a esfera celeste pelo que a sua identificação como planeta não é trivial. A descoberta como planeta aconteceu apenas em 1781 por William Herschel. Na Figura 29 temos uma foto do planeta tirada pela sonda Voyager 2 em 1986.

8.1 Eixo de rotação

O eixo de rotação de Úrano está inclinado 98° em relação ao seu plano orbital e o planeta roda no sentido retrógrado. Esta inclinação pode ter sido provocada por uma colisão ainda durante o processo de formação do Sistema Solar. Uma inclinação tão grande deve provocar alterações sazonais bastante acentuadas. Um dos polos do planeta fica virado de frente para o Sol cerca de metade do ano (que em Úrano corresponde a cerca de 42 anos terrestres) enquanto que o outro fica, durante o mesmo intervalo de tempo, mergulhado na escuridão. A Voyager 2 mediu uma temperatura aproximadamente constante por todo o planeta o que significa que deve existir um modo eficiente de transmissão de calor. A mudança de estação é acompanhada de grandes tempestades como podemos ver na Figura 30.

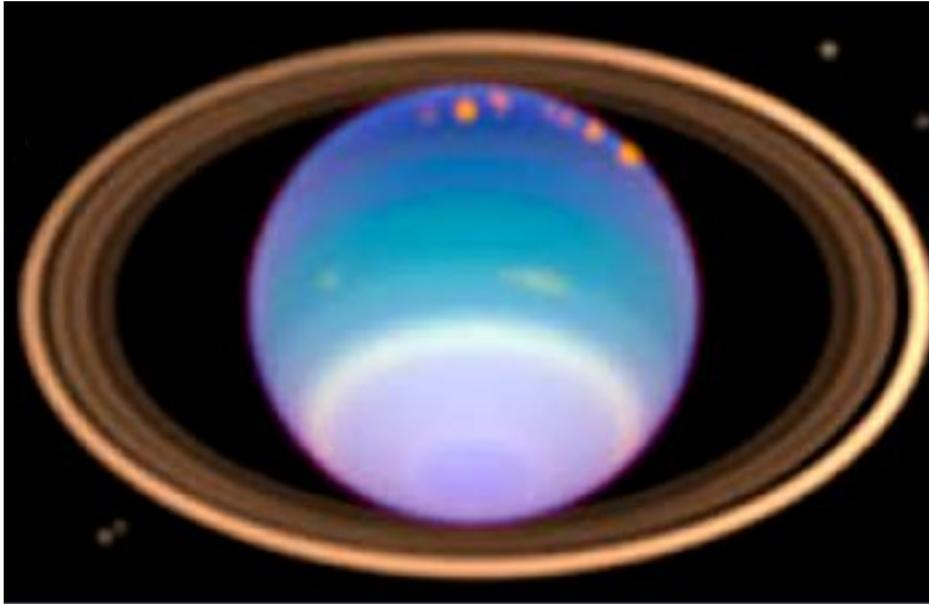


Figura 30: Esta imagem de IV obtida pelo HST coincide com a chegada da Primavera ao hemisfério norte de Úrano (no topo da imagem). São claramente visíveis grandes tempestades na atmosfera do planeta [28].

8.2 Atmosfera

A atmosfera de Úrano é composta em 82.5% por hidrogénio, 15.2% por hélio e 2.3% por metano. É a presença do metano que dá o tom azulado ao planeta. A temperatura na alta atmosfera é de -218 °C . Isto explica a ausência de amoníaco e água como existe nas atmosferas de Júpiter e Saturno onde a temperatura é mais elevada. Assim, as poucas nuvens observadas em Úrano são compostas por metano.

8.3 Interior de Úrano

Úrano tem densidade superior à de Júpiter e Saturno o que sugere um interior diferente. Este facto levanta uma série de questões sobre o processo e local de formação do planeta. O núcleo deve ser rochoso (essencialmente composto por silício e ferro) com a temperatura no centro a atingir os 7000 K. O núcleo por sua vez está envolto por um manto líquido composto por H_2O , NH_3 e CH_4 . O manto está rodeado por uma crosta de hélio e hidrogénio líquidos (a pressão não é suficiente para produzir hidrogénio metálico) – ver Figura 31.

8.4 Campo magnético

O eixo magnético do planeta está inclinado cerca de 59° em relação ao eixo de rotação. Em Neptuno a inclinação ronda os 47° . Estes valores contrastam com os dos restantes planetas do Sistema Solar onde o desvio nunca é superior a 12° . Estaremos perante uma inversão de polos magnéticos (como se pensa já ter acontecido na Terra) ou será isto uma sequela de uma colisão dos planetas com outro corpo durante a formação do Sistema Solar? Não sabemos.

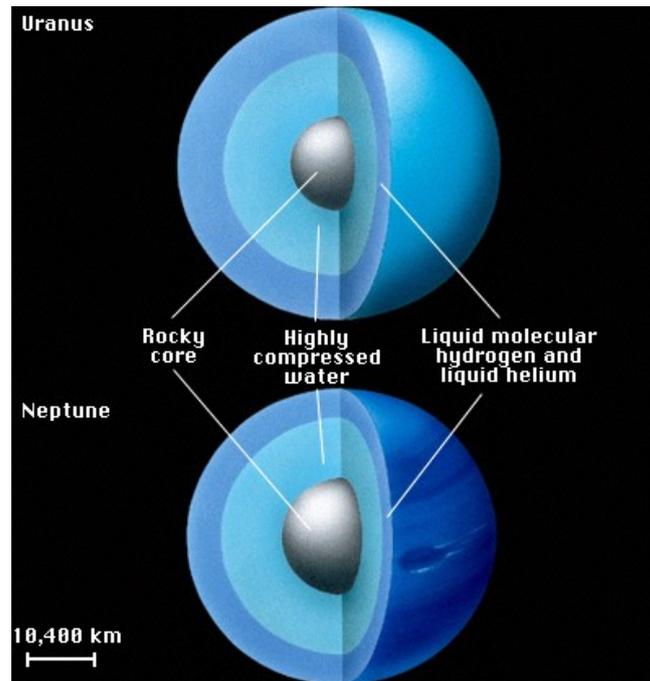


Figura 31: O interior dos planetas Úrano e Neptuno [19].

O campo magnético em Úrano e Neptuno não pode ser gerado pelo hidrogénio metálico, uma vez que, neste caso, este não existe. Neste caso o responsável pelo campo magnético é o NH_3 . De facto, devido às altas pressões o NH_3 perde um ou dois dos seus eletrões que, assim, podem fluir na água que está presente e é, por sinal, um bom condutor de eletricidade.

8.5 Anéis de Úrano

Foram descobertos acidentalmente em 1977 quando se procedia ao estudo da ocultação de uma estrela pelo planeta. Descobriram-se na altura nove anéis. A Voyager 2 descobriu mais dois. Os anéis são finos e escuros. As suas partículas são relativamente pequenas (da ordem de 1 cm ou inferior), embora, algumas possam atingir os 10 m.

8.6 Luas de Úrano

Úrano tem pelo menos 27 luas. As cinco maiores (Titânia, Oberon, Ariel, Umbriel e Miranda — ver Figura 32) têm densidade $\approx 1500 \text{ kg/m}^3$ o que é compatível com uma mistura de gelo e rocha. Titânia e Ariel apresentam sinais deixados por correntes de lava que encheram as regiões mais baixas. Oberon e Umbriel são dominados por crateras de impacto. Miranda caracteriza-se por apresentar uma face repleta de crateras e outra com relevos (vales, montes, desfiladeiros) pelo que deve ter ocorrido, neste caso, um processo de rejuvenescimento da superfície que, entretanto, cessou deixando parte da superfície com o seu aspeto mais ancestral.



Figura 32: As cinco maiores luas de Úrano [29].

9 Neptuno

Cedo se descobriu que não era possível seguir com precisão a órbita de Úrano recorrendo às leis da Mecânica. Em 1845 dois astrónomos, um inglês e um francês, chegaram de forma independente à conclusão de que deveria existir um planeta mais exterior a perturbar a órbita de Úrano. Um ano mais tarde foi descoberto esse planeta ao qual se deu o nome de Neptuno.

Neptuno embora tenha algumas semelhanças com Úrano tem também diversas diferenças. É muito parecido com Úrano no seu tamanho, aspeto e composição atmosférica. Tem no, entanto, 18% mais massa, a inclinação do eixo de rotação é de apenas 29.5° e a sua atmosfera é muito mais dinâmica. Na Figura 33 temos uma foto do planeta tirada pela sonda Voyager 2 em 1989.

9.1 Atmosfera

A temperatura no topo da atmosfera é de -218°C . O facto de Neptuno estar mais longe do Sol do que Úrano e, mesmo assim, ter uma temperatura semelhante, significa que deve existir em Neptuno uma fonte de calor interna (como acontece em Júpiter e Saturno). Provavelmente Neptuno ainda está a passar por um processo de contração gravitacional.

A Voyager 2 registou na atmosfera do planeta uma *Grande Mancha Escura* (Figura 33) muito parecida com a Grande Mancha Vermelha de Júpiter (em localização, tamanho e dinâmica). Alguns anos depois, registos obtidos pelo HST revelaram que a mancha havia desaparecido por completo.

Foram observadas nuvens brancas nas altas camadas da atmosfera. Estas devem ser compostas por cristais de metano que ao subir na atmosfera, por convexão, acabam por solidificar.

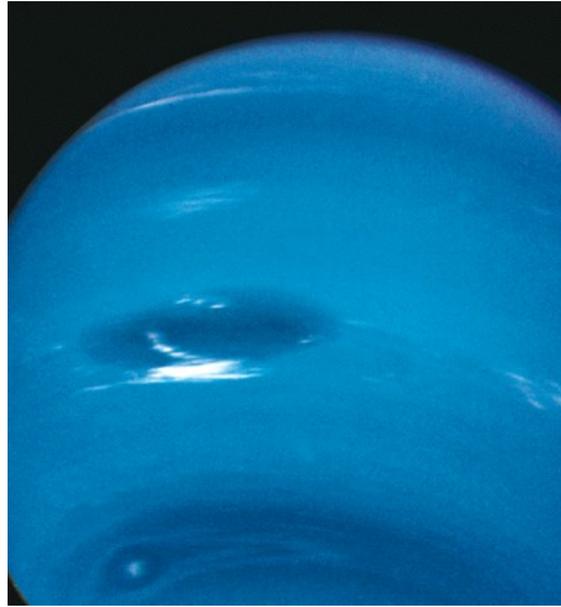


Figura 33: O planeta Neptuno fotografado pela sonda Voyager 2 em 1989. Podem ver-se algumas tempestades com particular destaque para a *Grande Mancha Escura* [19].

9.2 Interior de Neptuno e campo magnético

Julga-se que o interior de Neptuno deve ser em tudo semelhante ao interior de Úrano (ver Secção 8.3, Figura 31). O mesmo acontece com o respetivo campo magnético (ver Secção 8.4).

9.3 Anéis de Neptuno

Neptuno tem também um sistema de anéis finos e escuros. À semelhança do que acontece em Úrano estes são compostos por partículas, relativamente pequenas (tamanhos inferiores a 1 cm), embora, algumas possam atingir os 10 m.

9.4 Tritão

Trata-se do maior satélite de Neptuno. O seu movimento tem sentido retrógrado (contrário ao da rotação de Neptuno) e o seu plano orbital está inclinado cerca de 23° em relação ao plano equatorial do planeta. Provavelmente Tritão formou-se noutro ponto do Sistema Solar e acabou por ser capturado por Neptuno.

A superfície de Tritão não tem crateras grandes o que significa que esta é relativamente jovem (Figura 34). Existem regiões que fazem lembrar lagos gelados ou caldeiras de vulcões gelados entretanto extintos. Este processo de rejuvenescimento da superfície pode ter tido lugar quando a lua foi capturada por Neptuno. A Voyager 2 registou géiseres (com 8 km de altura) com material a ser ejetado de Tritão. Provavelmente este material alimenta a ténue atmosfera de N_2 observada nesta lua.

Devido ao seu movimento retrógrado Tritão tende a aproximar-se gradualmente de Neptuno. Daqui por cerca de 100 milhões de anos Tritão irá ultrapassar o chamado *Limite de Roche* e será

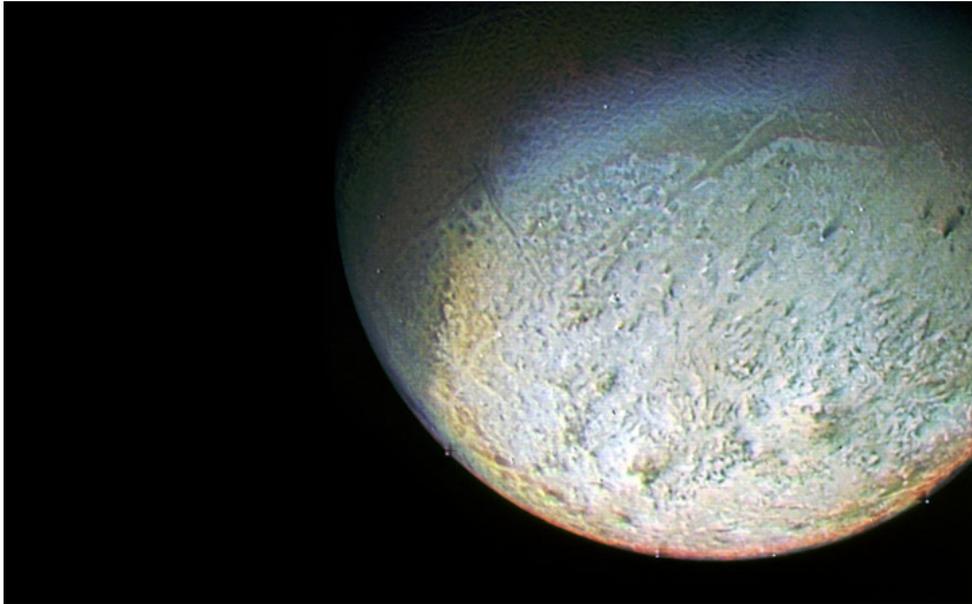


Figura 34: Tritão: a maior lua de Neptuno fotografada pela Voyager 2 [30].

desfeito pelas forças de maré impostas por Neptuno dando provavelmente origem a um anel.

Para além de Tritão são conhecidas atualmente outras 12 luas no sistema de Neptuno. Todas elas de dimensão inferior.

Referências

- [1] Freedman R. A. & Kaufmann III, W. J., 2005, *Universe*, seventh edition, W. H. Freeman and Company, New York.
- [2] Kutner, M. L., 2003, *Astronomy: A Physical Perspective*, 2nd edition, Cambridge University Press, United Kingdom.
- [3] <http://www.physics.unc.edu/~evans/pub/A31/Lecture09-Earth/> (material de apoio a [1]).
- [4] <http://www.physics.unc.edu/~evans/pub/A31/Lecture10-Moon/> (material de apoio a [1]).
- [5] <http://www.physics.unc.edu/~evans/pub/A31/Lecture11-Mercury/> (material de apoio a [1]).
- [6] http://www.lpl.arizona.edu/undergrad/classes/spring2011/Hubbard_206/Lectures2/Feb15.htm (2012).
- [7] <http://www.physics.unc.edu/~evans/pub/A31/Lecture12-Venus-Mars/> (material de apoio a [1]).
- [8] NASA/JPL, <http://www.britannica.com/EBchecked/media/72954/Venus-photographed-in-ultraviolet-light-by-the-Pioneer-Venus-Orbiter>.
- [9] NASA/JPL, http://photography.nationalgeographic.com/photography/enlarge/venus-volcano_pod_image.html.
- [10] GAUMa, 2005, http://www3.uma.pt/Investigacao/Astro/Grupo/Divulgacao/Cursos/Sa2005_marte/index.htm
- [11] MOLA Science Team, MGS, NASA (2001), <http://apod.nasa.gov/apod/ap010628.html>
- [12] NASA, <http://marsprogram.jpl.nasa.gov/gallery/atlas/olympus-mons.html>
- [13] NASA, http://photojournal.jpl.nasa.gov/jpegMod/PIA00422_modest.jpg

- [14] NASA, http://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/2005_dust_devil.html
- [15] NASA, http://www.iceandclimate.nbi.ku.dk/research/ice_other_planets/ice_on_mars/no_liquid_water/
- [16] NASA/JPL/Malin Space Science Systems, http://www.nasa.gov/mission_pages/mars/news/mgs-20061206.html
- [17] NASA, <http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Jupiter>
- [18] http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_413.html
- [19] <http://www.physics.unc.edu/~evans/pub/A31/Lecture13-Outer-Planets/> (material de apoio a [1]).
- [20] NASA, <http://history.nasa.gov/SP-349/ch1.htm>
- [21] <http://astronomyonline.org/solarsystem/galileanmoons.asp>
- [22] NASA, http://starchild.gsfc.nasa.gov/docs/StarChild/solar_system_level2/io_volcano.html
- [23] NASA, http://solarsystem.nasa.gov/scitech/display.cfm?ST_ID=2488
- [24] NASA/JPL, <http://www.solarviews.com/cap/jup/galgany5.htm>
- [25] NSSDC Photo Gallery – Saturn, http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery/photogallery-saturn.html
- [26] NASA/JPL and NASA/JPL/SSI, http://www.nasa.gov/mission_pages/voyager/voyager20101111.html
- [27] ESA/NASA/JPL/University of Arizona, http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/titan_images.html
- [28] NASA, Eric Karkoschka (Univ. of Arizona), Heidi Hammell (MIT), and STScI, <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1999/11>
- [29] <http://www.daviddarling.info/encyclopedia/U/Uranusmoons.html>
- [30] NASA, http://solarsystem.nasa.gov/scitech/display.cfm?ST_ID=2493