



UMA INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA

Prof. Dr. Fernando R de Paula
Departamento de Física e Química

Ilha Solteira 2024



7 OUTROS MUNDOS: UMA INTRODUÇÃO AO SISTEMA SOLAR

7.1 VISÃO GERAL DO NOSSO SISTEMA PLANETÁRIO

O sistema solar consiste no Sol e em muitos objetos menores: os planetas, suas luas e anéis, e “detritos” como asteroides, cometas e poeira. Décadas de observação e exploração de espaçonaves revelaram que a maioria desses objetos se formou junto com o Sol há cerca de 4,5 bilhões de anos. Eles representam aglomerados de material que se condensou de uma enorme nuvem de gás e poeira. A parte central dessa nuvem tornou-se o Sol, e uma pequena fração do material nas partes externas acabou formando os outros objetos.

Durante os últimos 50 anos, aprendemos mais sobre o sistema solar do que qualquer um imaginava antes da era espacial. Além de coletar informações com novos e poderosos telescópios, enviamos naves espaciais diretamente para muitos membros do sistema planetário. “A astronomia planetária é o único ramo de nossa ciência em que podemos, pelo menos indiretamente, viajar para os objetos que queremos estudar”. Com nomes evocativos como *Voyager*, *Pioneer*, *Curiosity* e *Pathfinder*, nossos robôs exploradores passaram voando, orbitou ou pousou em todos os planetas, enviando imagens e dados que deslumbraram tanto os astrônomos quanto o público. No processo, também investigamos dois planetas anões, centenas de luas fascinantes, quatro sistemas de anéis, uma dúzia de asteroides e vários cometas.

Nossas sondas penetraram na atmosfera de Júpiter e pousaram nas superfícies de Vênus, Marte, nossa Lua, a lua de Saturno Titã, os asteroides Eros e Itokawa e o cometa Churyumov-Gerasimenko (geralmente referido como 67P). Os humanos colocaram os pés na Lua e trouxeram amostras de seu solo superficial para análise laboratorial. Até

descobrimos outros lugares em nosso sistema solar que podem ser capazes de sustentar algum tipo de vida.

UM INVENTÁRIO DO SISTEMA SOLAR

O Sol, uma estrela que é mais brilhante do que cerca de 80% das estrelas da Galáxia, é de longe o membro mais massivo do sistema solar, como mostra a Tab. 7.1. É uma enorme bola com cerca de 1,4 milhão de quilômetros de diâmetro, com camadas superficiais de gás incandescente e uma temperatura interna de milhões de graus.

Tabela 7.1: Massa dos corpos do Sistema Solar

Objeto	Porcentagem de massa total do sistema solar (%) *Valor estimado
Sol	99,80
Júpiter	0,10
Cometas	0,0005-0,03 *
Todos os outros planetas e planetas anões	0,04
Luas e anéis	0,00005
Asteroides	0,000002 *
Poeira cósmica	0,0000001 *

A Tab. 7.1 também mostra que a maior parte do material dos planetas está realmente concentrado em Júpiter, que é mais massivo do que todos os outros planetas juntos. Os astrônomos foram capazes de determinar as massas dos planetas séculos atrás usando as leis do movimento planetário de Kepler e a lei da gravidade de Newton para medir os efeitos gravitacionais dos planetas uns sobre os outros ou nas luas que os orbitam. Hoje, fazemos medições ainda mais precisas de suas massas rastreando seus efeitos gravitacionais no movimento das espaçonaves que passam perto deles.

Além da Terra, cinco outros planetas eram conhecidos pelos antigos, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno, e dois foram descobertos após a invenção do telescópio: Urano e Netuno. Os oito planetas giram todos na mesma direção ao redor do Sol.

Cada planeta segue uma órbita quase circular em torno do Sol e obedecendo às leis descobertas por Galileu, Kepler e Newton. Além desses planetas, também descobrimos mundos menores além de Netuno que são chamados de objetos transnetunianos ou TNOs (veja a Fig. 7.1). O primeiro a ser encontrado, em 1930, foi Plutão, mas outros foram descobertos durante o século XXI. Um deles, Eris, tem aproximadamente o mesmo tamanho de Plutão e tem pelo menos uma lua (Plutão tem cinco luas conhecidas). Os maiores TNOs também são classificados como planetas anões, assim como o maior asteroide, Ceres. Até o momento, mais de 1750 desses TNOs foram descobertos.

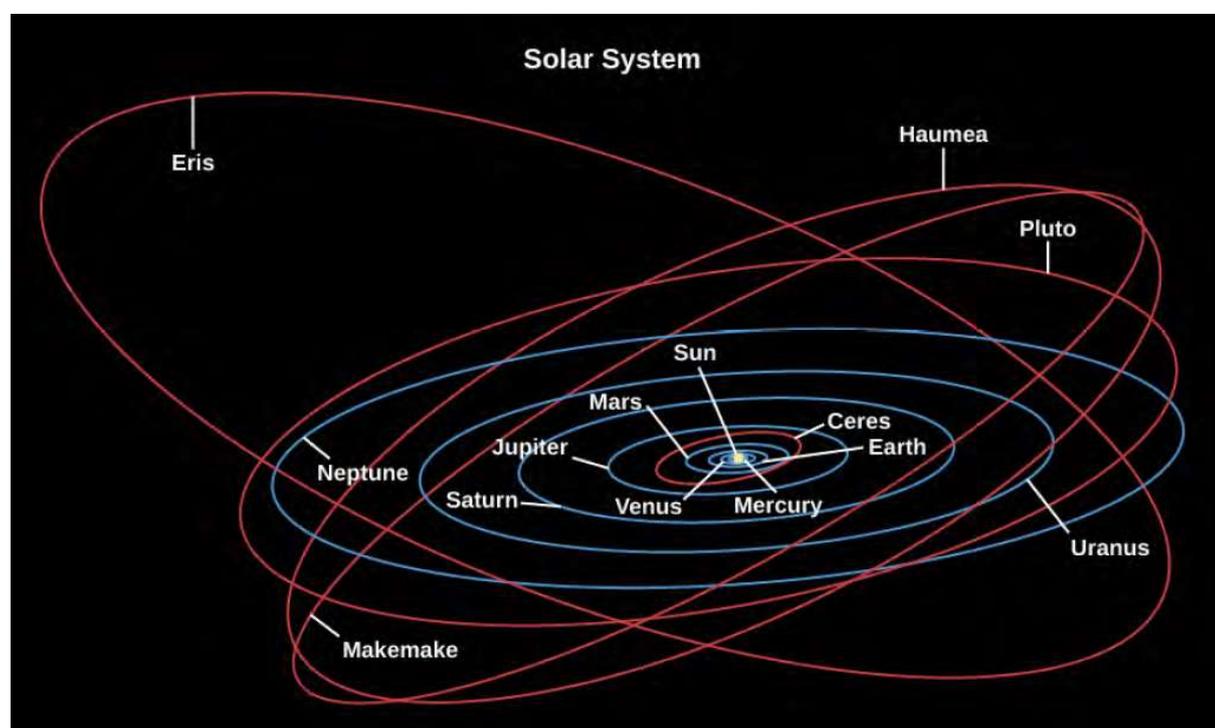


Figura 7.1: Órbitas dos Planetas. Todos os oito planetas principais orbitam o Sol aproximadamente no mesmo plano. Os cinco planetas anões atualmente conhecidos também são mostrados: Eris, Haumea, Plutão, Ceres e Makemake. Observe que a órbita de Plutão não está no plano dos planetas.

Cada um dos planetas e planetas anões também rotaciona (gira) em torno de um eixo que o atravessa e, na maioria dos casos, a direção de rotação é a mesma que a direção da revolução em torno do Sol. As exceções são Vênus, que gira para trás muito lentamente (ou seja, em uma direção retrógrada), e Urano e Plutão, que também têm rotações

estranhas, cada um girando em torno de um eixo inclinado quase de lado. Ainda não conhecemos as orientações de rotação de Eris, Haumea e Makemake.

Os quatro planetas mais próximos do Sol (de Mercúrio até Marte) são chamados de planetas internos ou terrestres. Muitas vezes, a Lua também é discutida como parte desse grupo, elevando o total de objetos terrestres para cinco. (Geralmente chamamos o satélite da Terra de "Lua", com L maiúsculo, e os outros satélites de "luas", com l minúsculo.) Os planetas terrestres são mundos relativamente pequenos, compostos principalmente de rocha e metal. Todos eles têm superfícies sólidas que guardam os registros de sua história geológica na forma de crateras, montanhas e vulcões (Fig. 7.2).

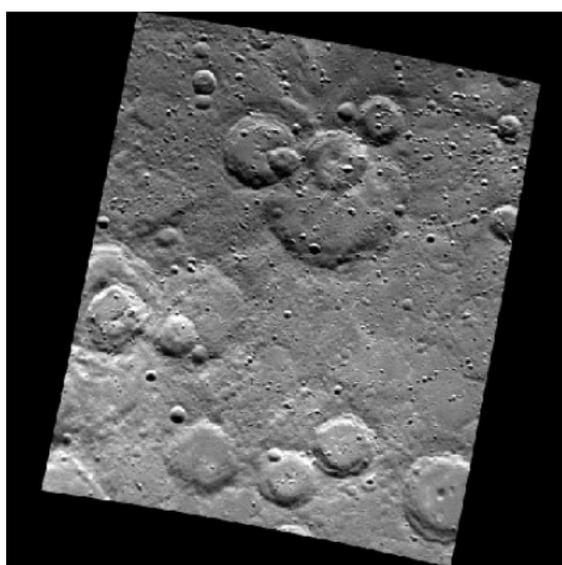


Figura 7.2: Superfície de Mercúrio. A face esburacada do mundo terrestre de Mercúrio é mais típica dos planetas internos do que a superfície aquosa da Terra. Esta imagem em preto e branco, tirada com a espaçonave Mariner 10, mostra uma região com mais de 400 quilômetros de largura.

Os próximos quatro planetas (de Júpiter a Netuno) são muito maiores e são compostos principalmente de gelos, líquidos e gases mais leves. Chamamos esses quatro planetas jovianos (depois de “Jove”, outro nome para Júpiter na mitologia) ou planetas gigantes, um nome que eles merecem (Fig. 7.3). Mais de 1400 Terras poderiam caber dentro de Júpiter, por exemplo. Esses planetas não têm superfícies sólidas nas quais futuros exploradores possam pousar. Eles são mais como vastos oceanos esféricos com núcleos muito menores e densos.

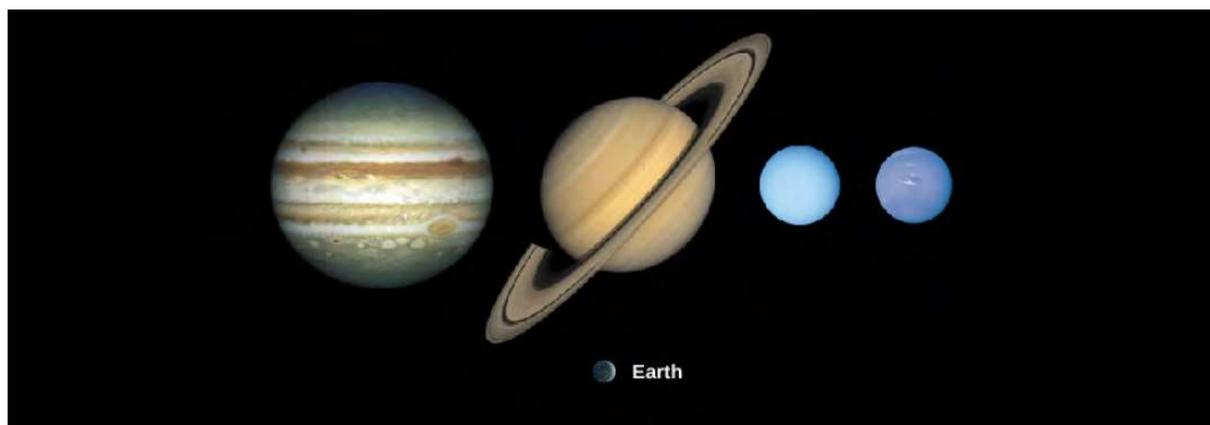


Figura 7.3: Os Quatro Planetas Gigantes. Esta montagem mostra os quatro planetas gigantes: Júpiter, Saturno, Urano e Netuno. Abaixo deles, a Terra é mostrada em escala.

Perto da borda externa do sistema fica Plutão, que foi o primeiro dos mundos gelados distantes a ser descoberto além de Netuno (Plutão foi visitado por uma espaçonave, a missão NASA New Horizons, em 2015 (ver Fig. 7.3). A Tab. 7.2 resume alguns dos principais fatos sobre os planetas.



Figura 7.4: Close de Plutão. Esta imagem intrigante da espaçonave New Horizons, tirada quando passou pelo planeta anão em julho de 2015, mostra algumas de suas características complexas de superfície. A área branca arredondada está sendo temporariamente chamada de Planície Sputnik, em homenagem à primeira espaçonave da humanidade.

Tabela 7.2: Os Planetas

Nome	Distância do sol (UA)	Período de revolução	Diâmetro (km)	Massa (10^{23} kg)	Densidade (g/cm^3)
Mercúrio	0,39	0,24	4.878	3,3	5,4
Vênus	0,72	0,62	12.120	48,7	5,2
Terra	1,00	1,00	12.756	59,8	5,5
Marte	1,52	1,88	6.787	6,4	3,9
Júpiter	5,20	11,86	142.984	18.997	1,3
Saturno	9,54	29,46	120.536	5.686	0,7
Urano	19,18	84,07	51.118	866	1,3
Netuno	30,06	164,82	49.660	1.030	1,6

PEQUENOS MEMBROS DO SISTEMA SOLAR

A maioria dos planetas é acompanhada por uma ou mais luas; apenas Mercúrio e Vênus se movem sozinhos no espaço. Existem mais de 180 luas conhecidas orbitando planetas e planetas anões, e sem dúvida muitos outros pequenos permanecem desconhecidos. As maiores luas são tão grandes quanto pequenos planetas e tão interessantes quanto. Além de nossa Lua, eles incluem as quatro maiores luas de Júpiter (chamadas de luas galileanas, em homenagem ao seu descobridor) e as maiores luas de Saturno e Netuno (confusamente chamadas Titã e Tritão).

Cada um dos planetas gigantes também tem anéis compostos de inúmeros pequenos corpos que variam em tamanho de montanhas a meros grãos de poeira, todos em órbita ao redor do equador do planeta. Os anéis brilhantes de Saturno são, de longe, os mais fáceis de ver. Eles estão entre as mais belas paisagens do sistema solar (Fig. 7.5). Mas, todos os quatro sistemas de anéis são interessantes para os cientistas por causa de suas formas complicadas, influenciadas pela atração das luas que também orbitam esses planetas gigantes.



Figura 7.5: Saturno e seus anéis. Esta imagem de 2007 da Cassini mostra Saturno e seu complexo sistema de anéis, tirado de uma distância de cerca de 1,2 milhão de quilômetros. Esta imagem de cor natural é uma composição de 36 imagens tiradas ao longo de 2,5 horas.

O sistema solar tem muitos outros membros menos visíveis. Outro grupo são os asteroides, corpos rochosos que orbitam o Sol como planetas em miniatura, principalmente no espaço entre Marte e Júpiter (embora alguns cruzem as órbitas de planetas como a Terra (veja a Fig. 7.6). A maioria dos asteroides são remanescentes da população inicial do sistema solar que existia antes da formação dos próprios planetas. Algumas das menores luas dos planetas, como as luas de Marte, são provavelmente asteroides capturados.



Figura 7.6: Asteroide Eros. Esta pequena imagem de asteroide cruzando a Terra foi tirada pela espaçonave NEAR-Shoemaker de uma altitude de cerca de 100 quilômetros. Esta visão da superfície densamente craterada tem cerca de 10 quilômetros de largura. A espaçonave orbitou Eros por um ano antes de pousar suavemente em sua superfície.

Outra classe de pequenos corpos é composta principalmente de gelo, feito de gases congelados como água, dióxido de carbono e monóxido de carbono; esses objetos são chamados de cometas (veja a Fig. 7.7). Os cometas também são remanescentes da formação do sistema solar, mas foram formados e continuam (com raras exceções) a orbitar o Sol em regiões distantes e mais frias, armazenados em uma espécie de congelamento cósmico. Este é também o reino dos mundos gelados maiores, chamados planetas anões.

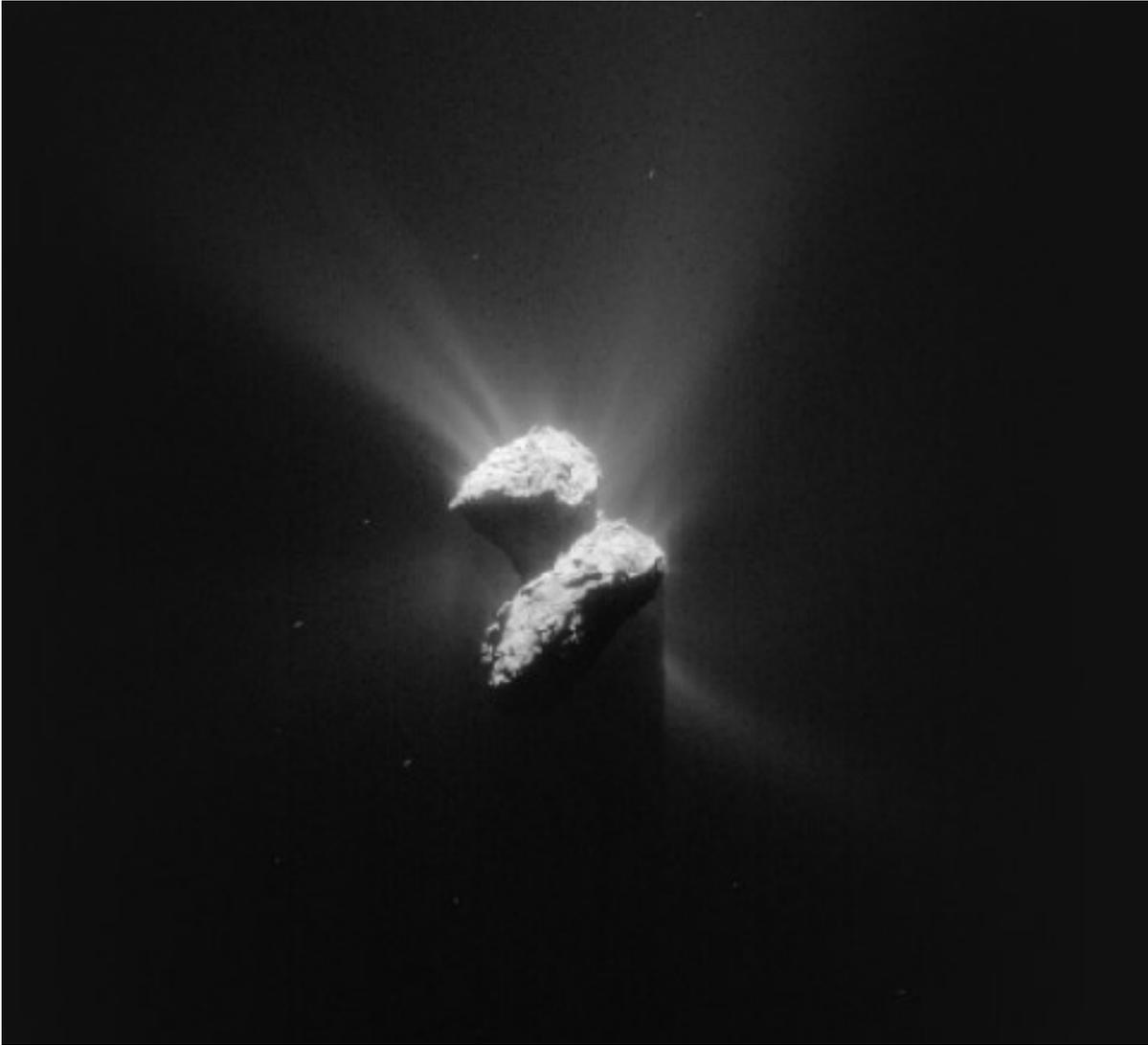


Figura 7.7: Cometa Churyumov-Gerasimenko (67P). Esta imagem mostra o cometa Churyumov-Gerasimenko, também conhecido como 67P, perto de sua maior aproximação ao Sol em 2015, visto da sonda Rosetta. Observe os jatos de gás escapando da superfície sólida.

Finalmente, existem inúmeros grãos de rocha, que chamamos de poeira cósmica, espalhados por todo o sistema solar. Quando essas partículas entram na atmosfera da Terra (milhões fazem todos os dias), elas queimam, produzindo um breve flash de luz no céu noturno conhecido como meteoro (os meteoros são frequentemente chamados de estrelas cadentes). Ocasionalmente, algum pedaço maior de material rochoso ou metálico sobrevive à sua passagem pela atmosfera e colidem com a superfície da Terra. Qualquer pedaço que atinge o solo é conhecido como meteorito.

As diferenças entre asteroide, meteoro e meteorito são expostas na Fig. 7.8.

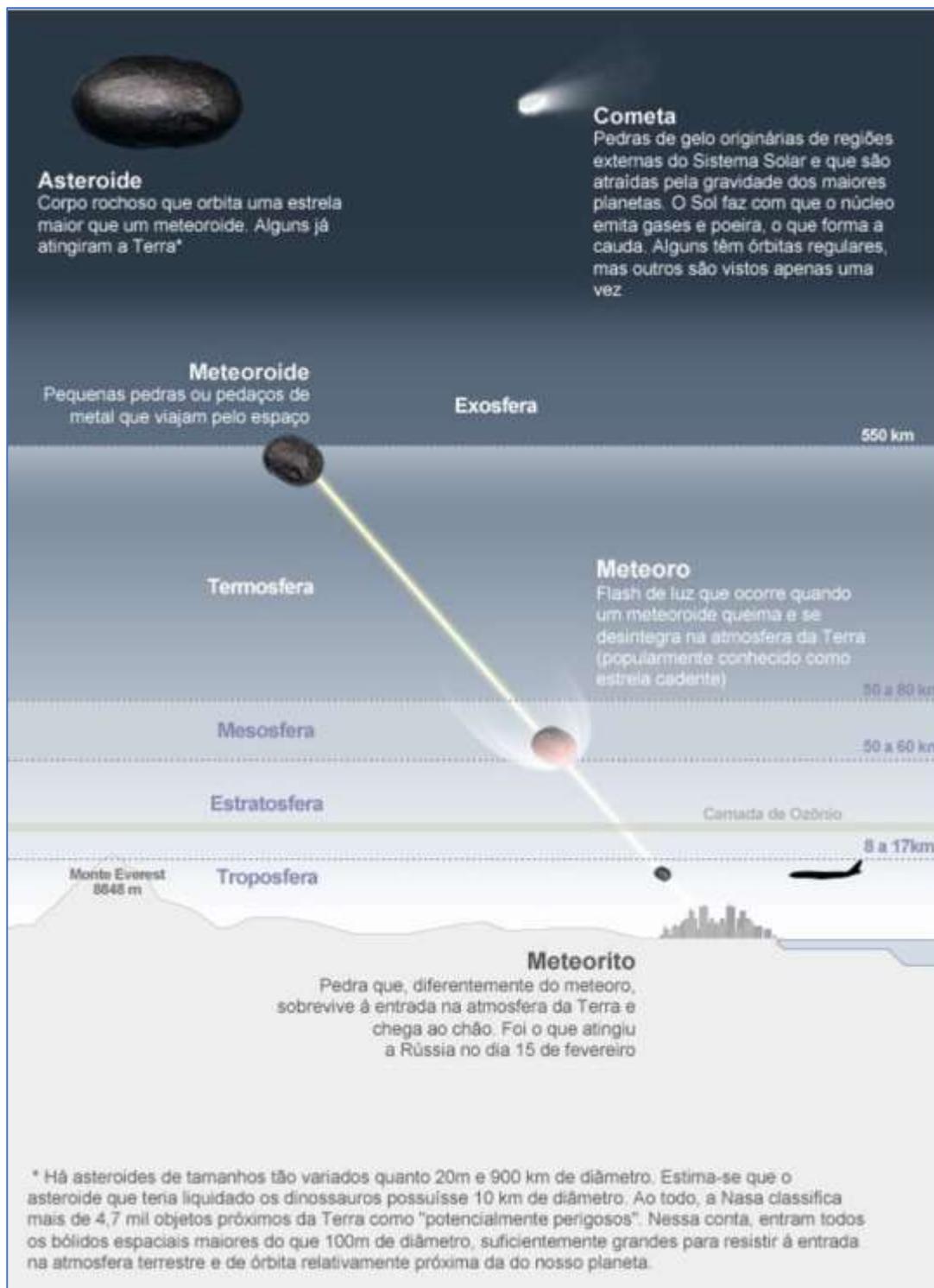


Figura 7.8: Asteroide, meteorito e meteoro: entenda a diferença entre corpos que podem se chocar com nosso planeta.

UM MODELO EM ESCALA DO SISTEMA SOLAR

A astronomia geralmente lida com dimensões e distâncias que excedem em muita nossa experiência comum, portanto é útil um modelo em escala.

Em nossa imaginação, vamos construir um modelo em escala do sistema solar, adotando um fator de escala de 1 bilhão (10^9) - ou seja, reduzindo o sistema solar real dividindo cada dimensão por um fator de 10^9 . A Terra, então, tem um diâmetro de 1,3 centímetros, mais ou menos do tamanho de uma uva. A Lua é uma ervilha (0,5 cm) orbitando a terra uma distância de 40 centímetros.

Neste modelo, o Sol tem quase 1,5 metros de diâmetro, aproximadamente a altura média de um adulto, e nossa Terra está a uma distância de 150 metros, cerca de um quarteirão do Sol. Júpiter está a cinco quarteirões do Sol e seu diâmetro é de 15 centímetros. Saturno está a 10 quarteirões do Sol; Urano, 20 quarteirões; e Netuno, 30 quarteirões. Plutão, com uma distância que varia bastante durante sua órbita de 249 anos, está atualmente um pouco além de 30 quarteirões e se distanciando com o tempo. A maioria das luas do sistema solar externo possuem, nesta escala adotada, tanho de poucos milímetros.

Em nosso modelo em escala, um humano é reduzido às dimensões de um único átomo, e carros e naves espaciais ao tamanho de moléculas. O envio da espaçonave Voyager para Netuno envolve a navegação de uma única molécula da Terra (dimensões de uma uva) em direção a um limão a 5 quilômetros de distância com uma precisão equivalente à largura de um fio de teia de aranha. **Incrível!!!!!!!**

Se esse modelo representa o sistema solar, onde estariam as estrelas mais próximas? Se mantivermos a mesma escala, as estrelas mais próximas estariam a dezenas de milhares de quilômetros de distância. Se você construísse essa maquete na cidade onde mora, teria que colocar as representações dessas estrelas do outro lado da Terra ou além.

NOME NO SISTEMA SOLAR

Nós, humanos, simplesmente não nos sentimos confortáveis até que algo tenha um nome. Tipos de borboletas, novos elementos e as montanhas de Vênus precisam de nomes para nos sentirmos familiarizados com eles. Como damos nomes a objetos e características do sistema solar?

Planetas e luas recebem nomes de deuses e heróis na mitologia grega e romana (com algumas exceções entre as luas de Urano, que têm nomes extraídos da literatura inglesa).

Quando William Herschel, um imigrante alemão na Inglaterra, descobriu pela primeira vez o planeta que hoje chamamos de Urano, ele quis chamá-lo de Georgium Sidus (estrela de George) em homenagem ao rei George III de seu país adotivo. Isso causou tanto clamor entre os astrônomos de outras nações, no entanto, que a tradição clássica foi mantida, e tem sido mantida desde então. Felizmente, havia muitos deuses menores no antigo panteão, então muitos nomes são deixados para as muitas pequenas luas que estamos descobrindo ao redor dos planetas gigantes.

Os cometas costumam receber o nome de seus descobridores. Os asteroides são nomeados por seus descobridores, e pode ser qualquer coisa que eles queiram. Recentemente, nomes de asteroides foram usados para reconhecer pessoas que fizeram contribuições significativas para a astronomia.

Essa foi praticamente toda a nomenclatura necessária enquanto nosso estudo do sistema solar estava confinado à Terra. Mas agora, nossa espaçonave pesquisou e fotografou muitos mundos em grande detalhe, e cada mundo tem uma série de características que também precisam de nomes. Atualmente os astrônomos deram a responsabilidade de aprovar nomes a um comitê especial da União Astronômica Internacional (IAU), o órgão que inclui cientistas de todos os países.

Este comitê da IAU desenvolveu um conjunto de regras para nomear “coisas” em outros mundos. Por exemplo, as crateras em Vênus são nomeadas como nomes de mulheres que fizeram contribuições significativas para o conhecimento e o bem-estar humano. As características vulcânicas da lua de Júpiter Io, que está em constante estado de atividade vulcânica, são nomeadas em homenagem aos deuses do fogo e do trovão das mitologias de muitas culturas. Crateras em Mercúrio homenageiam romancistas, dramaturgos, artistas e compositores famosos. Na lua de Saturno, Tétis, todas as características têm nomes de personagens e lugares do grande poema épico de Homero, A Odisseia.

Plutão não é mais planeta? Você pode se surpreender ao saber que o significado da palavra planeta recentemente se tornou controverso porque descobrimos muitos outros sistemas planetários que não se parecem muito com o nosso. Mesmo dentro do nosso sistema solar, os planetas diferem muito em tamanho e propriedades químicas. A maior controversa diz respeito a Plutão, que é muito menor que os outros oito grandes planetas. A categoria de planeta anão foi inventada para incluir Plutão e objetos gelados semelhantes além de Netuno. Mas um planeta anão também é um planeta?

Logicamente, deveria ser, mas mesmo essa simples questão de gramática tem sido objeto de acalorado debate entre os astrônomos e o público em geral.

7.2 COMPOSIÇÃO E ESTRUTURA DOS PLANETAS

O fato de existirem dois tipos distintos de planetas, **os planetas rochosos terrestres e os planetas jovianos ricos em gás**, nos leva a acreditar que eles se formaram sob condições diferentes. Certamente suas composições são dominadas por diferentes elementos. Vejamos cada tipo com mais detalhes.

OS PLANETAS GIGANTES

Os dois maiores planetas, Júpiter e Saturno, têm quase a mesma composição química do Sol; eles são compostos principalmente dos dois elementos hidrogênio e hélio, com 75% de sua massa sendo hidrogênio e 25% hélio. Na Terra, tanto o hidrogênio quanto o hélio são gases, então Júpiter e Saturno às vezes são chamados de planetas gasosos.

Mas, este nome é enganoso. Júpiter e Saturno são tão grandes que o gás é comprimido em seu interior até que o hidrogênio se torne um líquido. Como a maior parte de ambos os planetas consiste em hidrogênio comprimido e liquefeito, devemos chamá-los de planetas líquidos.

Sob a força da gravidade, os elementos mais pesados afundam em direção às partes internas de um planeta líquido ou gasoso. Tanto Júpiter quanto Saturno, portanto, têm núcleos compostos de rochas mais pesadas, metal e gelo, mas não podemos ver essas regiões diretamente. Na verdade, o que vemos quando olhamos para baixo, estando muito além da superfície, é a atmosfera com suas nuvens (Fig. 7.9). Devemos inferir a existência do núcleo mais denso dentro desses planetas a partir de estudos da gravidade de cada planeta.



Figura 7.9: Júpiter. Esta imagem em cores reais de Júpiter foi tirada da espaçonave Cassini em 2000.

Urano e Netuno são muito menores que Júpiter e Saturno, mas cada um também tem um núcleo de rocha, metal e gelo. Urano e Netuno foram menos eficientes em atrair hidrogênio e gás hélio, então eles têm atmosferas muito menores em proporção aos seus núcleos.

Quimicamente, cada planeta gigante é dominado pelo hidrogênio e seus muitos compostos. Quase todo o oxigênio presente é combinado quimicamente com hidrogênio para formar água (H₂O). Em todo o sistema solar exterior, encontramos água abundante, principalmente na forma de gelo.

OS PLANETAS TERRESTRES

Os planetas terrestres são bem diferentes dos gigantes. Além de serem bem menores, são compostos principalmente por rochas e metais. Estes, por sua vez, são constituídos por elementos menos comuns no universo como um todo. As rochas mais abundantes, chamadas de silicatos, são feitas de silício e oxigênio, e o metal mais comum é o ferro.

Podemos dizer por suas densidades (ver Tab. 7.2) que Mercúrio tem a maior proporção de metais (que são mais densos) e a Lua tem o mais baixo. Terra, Vênus e Marte têm composições de massa aproximadamente semelhantes: cerca de um terço de sua massa consiste em combinações de ferro-níquel ou ferro-enzofre; dois terços é feito de silicatos.

Quando olhamos para a estrutura interna de cada um dos planetas terrestres, descobrimos que os metais mais densos estão em um núcleo central, com os silicatos mais leves perto da superfície. Quando olhamos para a estrutura interna de cada um dos planetas terrestres, descobrimos que os metais mais densos estão em um núcleo central, com os silicatos mais leves perto da superfície. Se esses planetas fossem líquidos, como os planetas



Figura 7.10: Processo de resfriamento da Terra

gigantes, poderíamos entender esse efeito como resultado do afundamento de elementos mais pesados devido à atração da gravidade. Isso nos leva a concluir que, embora os planetas terrestres sejam sólidos hoje, em algum momento do passado eles devem ter sido quentes o suficiente para derreter estes materiais (veja a Fig. 7.10).

A diferenciação é o processo pelo qual a gravidade ajuda a separar, em camadas de diferentes composições e densidades, o interior de um planeta. Os metais mais pesados afundam para formar um núcleo, enquanto os minerais mais leves flutuam para a superfície para formar uma crosta. Mais tarde, quando o planeta esfria, essa estrutura

em camadas é preservada. Para que este processo ocorra um planeta rochoso deve ser aquecido até o ponto de fusão das rochas, que normalmente é superior a 1300 K.

LUAS, ASTERIOIDES E COMETAS

Quimicamente e estruturalmente, a Lua da Terra é como os planetas terrestres, mas a maioria das luas estão no sistema solar externo e têm composições semelhantes aos núcleos dos planetas gigantes em torno dos quais orbitam. As três maiores luas, Ganimedes e Calisto no sistema joviano e Titã no sistema saturniano, são compostas por

metade de água congelada e metade de rochas e metais. A maioria dessas luas se diferenciou durante a formação e hoje têm núcleos de rocha e metal, com camadas superiores e crostas de gelo muito frio e, portanto, muito duro (Fig. 7.11).

A maioria dos asteroides e cometas, bem como as menores luas, provavelmente nunca foram aquecidas até o ponto de fusão (parece haver exceções como o asteroide Vesta). Como a maioria dos asteroides e cometas mantêm sua composição original que remonta à época da formação do sistema solar, em certo sentido, agem como fósseis químicos, ajudando-nos a aprender sobre um tempo cujos vestígios foram apagados em mundos maiores pelas



modificações que sofreram.

Figura 7.11: Ganímedes. Esta visão da lua de Júpiter, Ganímedes, foi tirada em junho de 1996 pela espaçonave Galileo. A cor cinza acastanhada da superfície indica uma mistura empoeirada de material rochoso e gelo. Os pontos brilhantes são lugares onde impactos recentes descobriram gelo fresco por baixo.

TEMPERATURAS: OS EXTREMOS

De um modo geral, quanto mais longe um planeta ou lua está do Sol, mais fria sua superfície. Os planetas são aquecidos pela energia radiante do Sol, que fica mais fraca com o quadrado da distância. Mercúrio, o planeta mais próximo do Sol, tem uma temperatura de superfície escaldante que varia de 280 a 430 °C em seu lado ensolarado, enquanto a temperatura da superfície de Plutão é apenas cerca de -220 °C, mais fria que o ar líquido. Matematicamente, as temperaturas diminuem aproximadamente na proporção da raiz quadrada da distância do Sol. Plutão está a cerca de 30 UA no ponto mais próximo do Sol (ou 100 vezes a distância de Mercúrio) e cerca de 49 UA no ponto mais distante do Sol. Assim, a temperatura de Plutão é menor que a de Mercúrio pela raiz quadrada de 100, ou um fator de 10: de 500 K a 50 K.

Além de sua distância do Sol, a temperatura da superfície de um planeta pode ser fortemente influenciada por sua atmosfera. Sem nosso isolamento atmosférico (o efeito estufa, que mantém o calor), os oceanos da Terra estariam permanentemente congelados. Por outro lado, se Marte já teve uma atmosfera maior no passado, poderia ter suportado um clima mais temperado do que tem hoje. Vênus é um exemplo ainda mais extremo, onde

sua espessa atmosfera de dióxido de carbono reduz a perda de calor (aumenta o efeito estufa) resultando em temperaturas maiores que as de Mercúrio. Hoje, a Terra é o único planeta onde as temperaturas da superfície geralmente ficam entre os pontos de congelamento e ebulição da água. Até onde sabemos, a Terra é o único planeta a suportar vida.

NÃO HÁ LUGAR COMO O LAR

No clássico filme *O Mágico de Oz*, Dorothy, a heroína, conclui após suas muitas aventuras em ambientes “alienígenas” que “não há lugar como o lar”. O mesmo pode ser dito dos outros mundos em nosso sistema solar. Há muitos lugares fascinantes, grandes e pequenos, que gostaríamos de visitar, mas os humanos não poderiam sobreviver sem muita ajuda artificial.

Uma espessa atmosfera de dióxido de carbono mantém a temperatura da superfície em nosso vizinho Vênus em escaldantes 700 K (perto de 430 °C). Marte, por outro lado, tem temperaturas geralmente abaixo de zero, com ar (também principalmente dióxido de carbono) tão fino que se assemelha ao encontrado a uma altitude de 30 quilômetros na atmosfera da Terra. E o planeta vermelho está tão seco que não chove há bilhões de anos. As camadas externas dos planetas jovianos não são suficientemente quentes nem suficientemente sólidas para a habitação humana.

Tudo isso sugere que é melhor cuidarmos bem da Terra porque é o único local onde a vida como a conhecemos poderia sobreviver.

ATIVIDADE GEOLÓGICA

As crostas de todos os planetas terrestres, bem como das luas maiores, foram modificadas ao longo de suas histórias por forças internas e externas. Externamente, cada um foi atingido por uma chuva de projéteis do espaço, que deixaram suas superfícies marcadas por crateras de impacto de todos os tamanhos (veja a Fig. 7.12). Temos boas evidências de que esse bombardeio foi muito maior no início da história do sistema solar, mas certamente continua até hoje, mesmo que em uma taxa menor. A colisão de mais de 20 grandes pedaços do Cometa Shoemaker–Levy 9 com Júpiter no verão de 1994 (veja a Fig. 7.13) é um exemplo dramático desse processo.



Figura 7.12: Crateras na Lua e no Arizona, Estados Unidos da América.

Durante o tempo em que todos os planetas estiveram sujeitos a tais impactos, forças internas nos planetas terrestres dobraram e torceram suas crostas, construíram cadeias de montanhas, entraram em erupção como vulcões e geralmente remodelaram as superfícies no que chamamos de atividade geológica. (O prefixo geo significa “Terra”, então este é um termo um pouco “chauvinista da Terra”, mas é tão amplamente usado que nos curvamos à tradição). Entre os planetas terrestres, a Terra e Vênus experimentaram a maior atividade geológica ao longo de suas histórias, embora algumas das luas do sistema solar externo também sejam surpreendentemente ativas. Em contraste, nossa própria Lua é um mundo morto onde a atividade geológica cessou bilhões de anos atrás.

A atividade geológica em um planeta é o resultado de um interior quente. As forças do vulcanismo e da construção de montanhas são impulsionadas pelo calor que escapa do interior dos planetas. Como veremos, cada um dos planetas foi aquecido no momento de seu nascimento, e esse calor primordial inicialmente impulsionou uma extensa atividade vulcânica, mesmo em nossa Lua. Mas, pequenos objetos como a Lua logo esfriaram. Quanto maior o planeta ou lua, mais tempo retém seu calor interno e, portanto, mais esperamos ver evidências de atividade geológica contínua na superfície.

Cada um dos planetas foi aquecido no momento de seu nascimento, e esse calor primordial inicialmente impulsionou uma extensa atividade vulcânica, mesmo em nossa Lua. Mas, pequenos objetos como a Lua logo esfriaram. Quanto maior o planeta ou lua, mais tempo retém seu calor interno e, portanto, mais esperamos ver evidências de atividade geológica contínua na superfície.

Na maior parte, a história da atividade vulcânica nos planetas terrestres está de acordo com as previsões desta teoria simples. A Lua, o menor desses objetos, é um mundo geologicamente morto. Embora saibamos menos sobre Mercúrio, parece provável que este planeta também cessou a maior parte da atividade vulcânica na mesma época que a Lua. Marte representa um caso intermediário. Tem sido muito mais ativo do que a Lua, mas menos do que a Terra. A Terra e Vênus, os maiores planetas terrestres, ainda têm interiores fundidos até hoje, cerca de 4,5 bilhões de anos após seu nascimento.

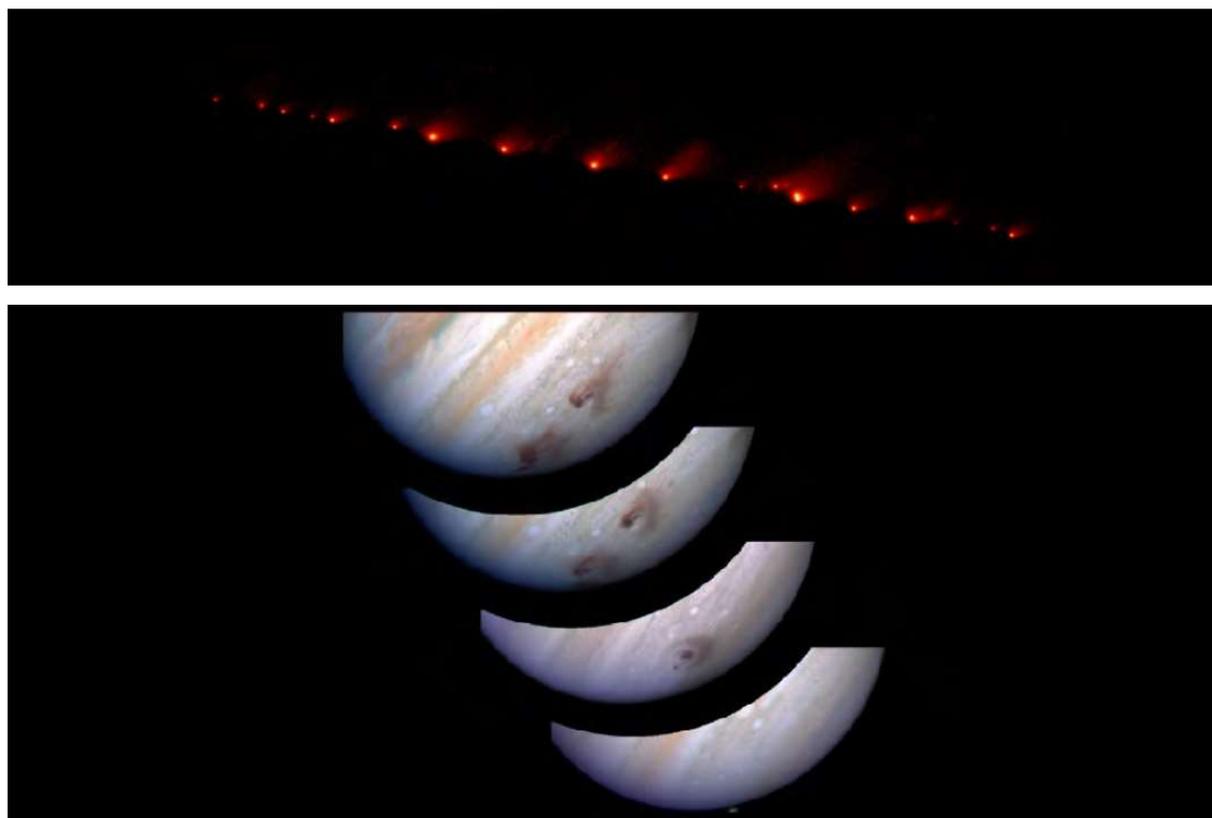


Figura 7.13: Cometa Shoemaker–Levy 9. Nesta imagem do cometa Shoemaker–Levy 9 tirada em 17 de maio de 1994 pelo Telescópio Espacial Hubble da NASA, você pode ver cerca de 20 fragmentos de gelo (o cometa se partiu) em rota de colisão com Júpiter. Abaixo, as consequências dessas colisões, quando nuvens de detritos maiores que a Terra podiam ser vistas na atmosfera de Júpiter.

7.3 ORIGEM DO SISTEMA SOLAR

Grande parte da astronomia é motivada pelo desejo de entender a origem das coisas: encontrar pelo menos respostas parciais para antigas perguntas sobre como surgiu o universo, o Sol, a Terra e nós mesmos. Cada planeta e lua é um lugar fascinante que pode estimular nossa imaginação enquanto tentamos imaginar como seria visitá-los. Os constituintes do sistema solar preservam padrões que podem nos contar sobre a formação de todo o sistema.

A recente descoberta de centenas de planetas em órbita ao redor de outras estrelas mostrou aos astrônomos que muitos sistemas exoplanetários podem ser bem diferentes do nosso próprio sistema solar. Por exemplo, é comum que esses sistemas incluam planetas de tamanho intermediário entre nossos planetas terrestres e gigantes. Estes são frequentemente chamados de superterras. Alguns sistemas de exoplanetas têm até planetas gigantes perto da estrela, invertendo a ordem que vemos em nosso sistema.

PROCURANDO PADRÕES

Uma maneira de abordar nossa questão de origem é procurar regularidades entre os planetas. Descobrimos, por exemplo, que todos os planetas estão quase no mesmo plano e giram na mesma direção ao redor do Sol. O Sol também gira na mesma direção em torno de seu próprio eixo. Os astrônomos interpretam esse padrão como evidência de que o Sol e os planetas se formaram juntos a partir de uma nuvem giratória de gás e poeira que chamamos de nebulosa solar (Fig. 7.14).

A composição dos planetas dá outra pista sobre as origens. A análise espectroscópica nos permite determinar quais elementos estão presentes no Sol e nos planetas. O Sol tem a mesma composição dominada por hidrogênio que Júpiter e Saturno e, portanto, parece ter sido formado a partir do mesmo reservatório primordial. Em comparação, os planetas terrestres e nossa Lua são relativamente deficientes de gases leves. Em vez disso, na Terra e em seus vizinhos, vemos principalmente os elementos pesados mais raros, como ferro e silício. Esse padrão sugere que os processos que levaram à formação de planetas no sistema solar interno devem de alguma forma ter excluído muitos dos materiais mais leves que são comuns em outros lugares. Esses materiais mais leves devem ter escapado, deixando um resíduo de material pesado.



Figura 7.14: Nebulosa Solar. A concepção deste artista da nebulosa solar mostra a nuvem achatada de gás e poeira a partir da qual nosso sistema planetário se formou. Planetesimais gelados e rochosos (precursores dos planetas) podem ser vistos em primeiro plano. O centro brilhante é onde o Sol está se formando.

A razão para isso não é difícil, tendo em conta o calor do Sol. Os planetas internos e a maioria dos asteroides são feitos de rocha e metal, que podem sobreviver ao calor, mas contêm muito pouco gelo ou gás, que evaporam quando as temperaturas estão altas. No sistema solar externo, onde sempre foi mais frio, os planetas e suas luas, bem como os planetas anões e cometas gelados, são compostos principalmente de gelo e gás.

AS EVIDÊNCIAS DE LONGE

Uma segunda abordagem para entender as origens do sistema solar é olhar para além do sistema solar em busca de outros sistemas de planetas que estão se formando (pelo menos acreditamos nisso) em outros lugares. Não podemos olhar para trás no tempo para a formação do nosso próprio sistema solar, mas muitas estrelas são muito mais jovens que o Sol. Nesses sistemas, os processos de formação de planetas ainda podem ser acessíveis à

observação direta. Observamos que existem muitas outras “nebulosas solares” ou discos circunstelares (nuvens achatadas e giratórias de gás e poeira ao redor de estrelas jovens). Esses discos se assemelham aos estágios iniciais de formação do nosso próprio sistema solar, bilhões de anos atrás (Fig. 7.15).

CONTRUINDO PLANETAS

Os discos circunstelares são uma ocorrência comum em torno de estrelas muito jovens, sugerindo que discos e estrelas se formam juntos. Os astrônomos podem usar cálculos teóricos para ver como os corpos sólidos podem se formar a partir do gás e da poeira nesses discos à medida que esfriam. Esses modelos mostram que o material começa a coalescer primeiro formando objetos menores, precursores dos planetas, que chamamos de planetesimais (A hipótese moderna para a origem do sistema solar é baseada na hipótese nebular, sugerida em 1755 pelo filósofo alemão Immanuel Kant (1724-1804), e em 1796 desenvolvida pelo matemático francês Pierre-Simon de Laplace (1749-1827), em seu livro *Exposition du Systéme du Monde*. Essa hipótese sugeria que uma grande nuvem rotante de gás interestelar, a nebulosa solar, colapsou para dar origem ao Sol e aos planetas – ver Fig. 7.16).

Os computadores de hoje podem simular a maneira como milhões de planetesimais, provavelmente não maiores que 100 quilômetros de diâmetro, podem se reunir sob sua gravidade mútua para formar os planetas que vemos hoje. Estamos começando a entender que esse processo foi violento, com planetesimais colidindo uns com os outros e às vezes até mesmo interrompendo os próprios planetas em crescimento. Como consequência desses impactos violentos (e do calor dos elementos radioativos neles), todos os planetas foram aquecidos até se tornarem líquidos e gasosos e, portanto, diferenciados, o que ajuda a explicar suas estruturas internas atuais.

O processo de impactos e colisões no início do sistema solar era complexo e, aparentemente, muitas vezes aleatório. O modelo da nebulosa solar pode explicar muitas das regularidades que encontramos no sistema solar, mas as colisões aleatórias de coleções massivas de planetesimais podem ser a razão de algumas exceções às “regras” de comportamento do sistema solar. Por exemplo, por que os planetas Urano e Plutão giram de lado? Por que Vênus gira lentamente e na direção oposta dos outros planetas? Por que a composição da Lua se assemelha à Terra de muitas maneiras e ainda exhibe diferenças substanciais? As

respostas a essas perguntas provavelmente estão em enormes colisões que ocorreram no sistema solar muito antes do início da vida na Terra.

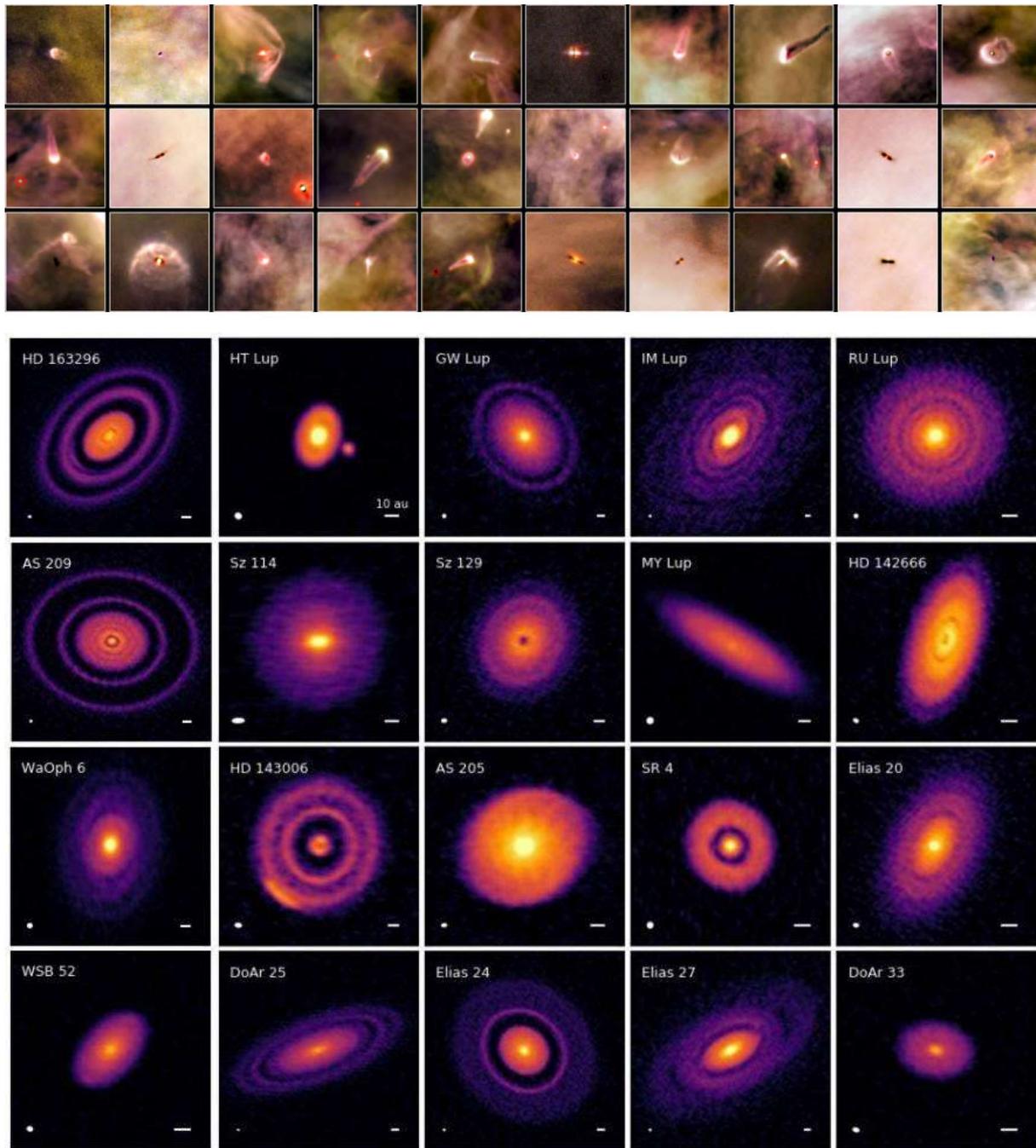


Figura 7.15: Atlas de Viveiros Planetários. Estas fotos do Telescópio Espacial Hubble mostram seções da Nebulosa de Órion, uma região relativamente próxima onde as estrelas estão se formando atualmente. Cada imagem mostra um disco circunestelar orbitando uma estrela muito jovem. Vistos de diferentes ângulos, alguns são energizados pela luz de uma estrela próxima e brilham, enquanto outros são escuros e vistos em silhueta contra o gás brilhante da Nebulosa de Órion. Cada um é um análogo contemporâneo de nossa própria nebulosa solar – um local onde os planetas provavelmente estão sendo formados hoje. 20 novos discos protoplanetários, conforme imagens do Disk Substructures at High Angular Resolution Project.

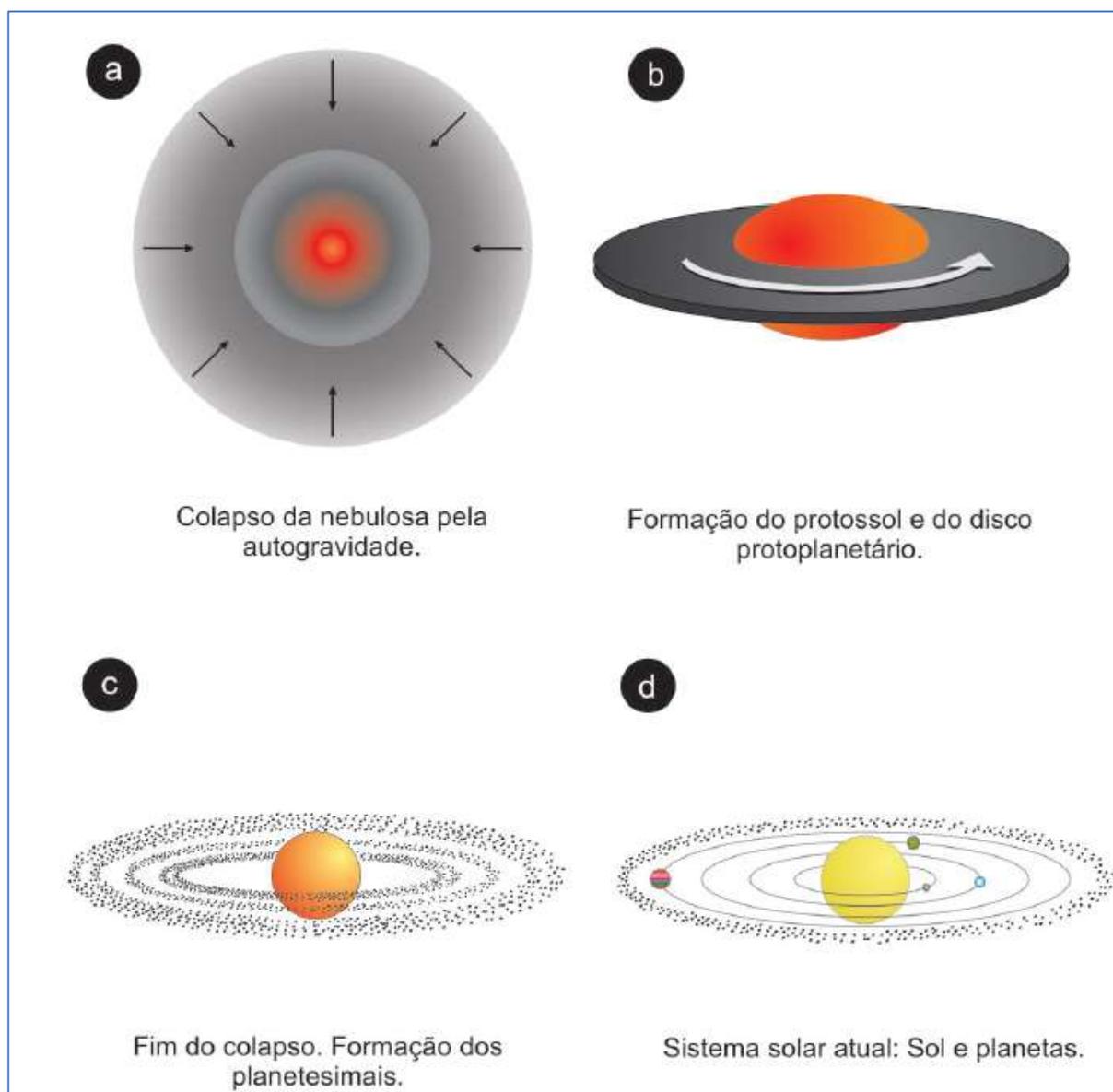


Figura 7.16: Etapas do processo de formação do Sistema Solar de acordo com o modelo da nebulosa solar.

7.4 ORIGEM DO SISTEMA SOLAR

Como vimos, os cometas, asteroides e meteoritos são remanescentes sobreviventes dos processos que formaram o sistema solar. Os planetas, luas e o Sol, são claro, também são produtos do processo de formação, embora o material neles tenha sofrido uma ampla gama de mudanças. Agora estamos prontos para reunir as informações de todos esses objetos para discutir o que se sabe sobre a origem do sistema solar.

RESTRIÇÕES OBSERVACIONAIS

Existem certas propriedades básicas do sistema planetário que qualquer teoria de sua formação deve explicar. Estes podem ser resumidos em três categorias: restrições de movimento, restrições químicas e restrições de idade. Nós as chamamos de *restrições* porque impõem restrições às nossas teorias; a menos que uma teoria possa explicar os fatos observados, ela não sobreviverá no mercado competitivo de ideias que caracteriza o esforço da ciência. Vamos dar uma olhada nessas restrições uma a uma.

Existem muitas regularidades nos movimentos do sistema solar. Vimos que todos os planetas giram em torno do Sol na mesma direção e aproximadamente no plano de rotação do próprio Sol. Além disso, a maioria dos planetas gira na mesma direção em que giram, e a maioria das luas também se move em órbitas no sentido anti-horário (quando vistas do Norte). Com exceção dos cometas e outros objetos transnetunianos, os movimentos dos membros do sistema definem um disco ou forma de Frisbee. No entanto, uma teoria completa também deve ser preparada para lidar com as exceções a essas tendências, como a *rotação retrógrada* (não a revolução) de Vênus.

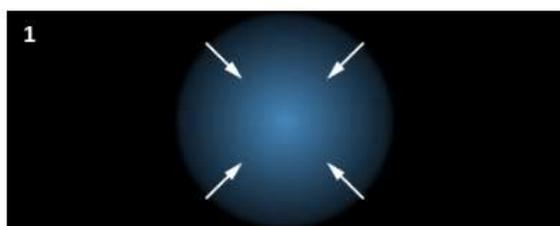
No reino da química, vimos que Júpiter e Saturno têm aproximadamente a mesma composição - dominada por hidrogênio e hélio. Estes são os dois maiores planetas, com gravidade suficiente para reter qualquer gás presente quando e onde se formaram; assim, podemos esperar que sejam representativos do material original do qual o sistema solar se formou. Cada um dos outros membros do sistema planetário é, até certo ponto, carente dos elementos leves. Um exame cuidadoso da composição de objetos sólidos do sistema solar mostra uma notável progressão dos planetas internos ricos em metais, passando por aqueles feitos predominantemente de materiais rochosos, até objetos com composições dominadas por gelo no sistema solar externo. Os cometas na nuvem de Oort e os objetos transnetunianos no cinturão de Kuiper também são objetos gelados. Como vimos em *Outros Mundos: Uma Introdução ao Sistema Solar*, esse padrão químico geral pode ser interpretado como uma sequência de temperatura: quente perto do Sol e mais frio à medida que nos afastamos. As partes internas do sistema geralmente não possuem os materiais que não poderiam condensar (formar um sólido) nas altas temperaturas encontradas perto do Sol. No entanto, existem (novamente) exceções importantes ao padrão geral. Por exemplo, é difícil explicar a presença de água na Terra e em Marte se esses planetas se formaram em uma região onde a temperatura era muito alta para condensar o gelo, a menos que o gelo ou a água fossem trazidos posteriormente de regiões mais frias. O

exemplo extremo é a observação de que existem depósitos polares de gelo tanto em Mercúrio quanto na Lua; estes são quase certamente formados e mantidos por impactos ocasionais de cometas.

No que diz respeito à idade, discutimos que a datação radioativa demonstra que algumas rochas na superfície da Terra estão presentes há pelo menos 3,8 bilhões de anos e que certas amostras lunares têm 4,4 bilhões de anos. Todos os meteoritos primitivos têm idades radioativas próximas a 4,5 bilhões de anos. A idade desses blocos de construção inalterados é considerada a idade do sistema planetário. A similaridade das idades medidas nos diz que os planetas se formaram e suas crostas esfriaram dentro de algumas dezenas de milhões de anos (no máximo) do início do sistema solar. Além disso, o exame detalhado de meteoritos primitivos indica que eles são feitos principalmente de material condensado ou coagulado a partir de um gás quente; poucos fragmentos identificáveis parecem ter sobrevivido antes desse estágio de vapor quente, 4,5 bilhões de anos atrás.

A NEBULOSA SOLAR

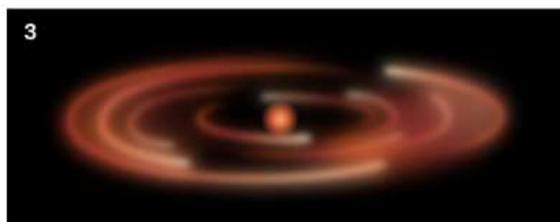
Todas as restrições anteriores são consistentes com a ideia geral, apresentada em *Outros Mundos: Uma Introdução ao Sistema Solar*, de que o sistema solar se formou há 4,5 bilhões de anos a partir de uma nuvem rotativa de vapor e poeira – que chamamos de nebulosa solar – com uma composição inicial semelhante à do Sol hoje. À medida que a nebulosa solar colapsava sob sua própria gravidade, o material caía em direção ao centro, onde as coisas se tornavam cada vez mais concentradas e quentes. As temperaturas crescentes na nebulosa encolhendo vaporizaram a maior parte do material sólido que estava originalmente presente.



1 The solar nebula contracts.



2 As the nebula shrinks, its motion causes it to flatten.



3 The nebula is a disk of matter with a concentration near the center.



4 Formation of the protosun. Solid particles condense as the nebula cools, giving rise to the planetesimals, which are the building blocks of the planets.

Figura 7.17: Etapas na formação do sistema solar. Esta ilustração mostra as etapas na formação do sistema solar a partir da nebulosa solar. À medida que a nebulosa encolhe, sua rotação faz com que ela se achate em um disco. Grande parte do material está concentrado no centro quente, que acabará se tornando uma estrela. Longe do centro, as partículas sólidas podem se condensar à medida que a nebulosa esfria, dando origem aos planetesimais, os blocos de construção dos planetas e luas.

Ao mesmo tempo, a nebulosa em colapso começou a girar mais rápido por meio da conservação do momento angular (consulte os capítulos Órbitas e Gravidade e Terra, Lua e Céu). Como uma patinadora artística puxando os braços para girar mais rápido, a nuvem encolhendo girou mais rapidamente com o passar do tempo. Agora, pense em como um objeto redondo gira. Perto dos pólos, a taxa de rotação é lenta e fica mais rápida à medida que você se aproxima do equador. Da mesma forma, perto dos pólos da nebulosa, onde as órbitas eram lentas, o material nebuloso caiu diretamente no centro. O material em movimento mais rápido, por outro lado, colapsou em um disco plano girando em torno do objeto central (ver Figura 7.17). A existência desta nebulosa rotativa em forma de disco explica os movimentos primários no sistema solar que discutimos na seção anterior. E como eles se formaram a partir de um disco giratório, todos os planetas orbitam da mesma maneira.

Imagine a nebulosa solar no final da fase de colapso, quando estava mais quente. Sem mais energia gravitacional (de material caindo) para aquecê-la, a maior parte da nebulosa começou a esfriar. O material no centro, no entanto, onde era mais quente e mais aglomerado, formou uma *estrela* que manteve altas temperaturas em sua vizinhança imediata produzindo sua própria energia. Movimentos turbulentos e campos magnéticos

dentro do disco podem drenar o momento angular, roubando parte do giro do material do disco. Isso permitiu que algum material continuasse a cair na estrela em crescimento, enquanto o resto do disco gradualmente se estabilizou.

A temperatura dentro do disco diminuiu com o aumento da distância do Sol, tanto quanto as temperaturas dos planetas variam com a posição atual. À medida que o disco esfriava, os gases interagiam quimicamente para produzir compostos; eventualmente, esses compostos condensaram-se em gotículas líquidas ou grãos sólidos. Isso é semelhante ao processo pelo qual as gotas de chuva na Terra se condensam do ar úmido à medida que sobe sobre uma montanha.

Vejamos com mais detalhes como o material se condensou em diferentes locais do disco de maturação (Figura 7.18). Os primeiros materiais a formar grãos sólidos foram os metais e vários silicatos formadores de rochas. À medida que a temperatura caiu, estes foram unidos em grande parte da nebulosa solar por compostos de enxofre e por silicatos ricos em carbono e água, como os encontrados agora em abundância entre os asteroides. No entanto, nas partes internas do disco, a temperatura nunca caiu o suficiente para que materiais como gelo ou compostos orgânicos carbonáceos se condensassem, então eles faltavam nos planetas mais internos.

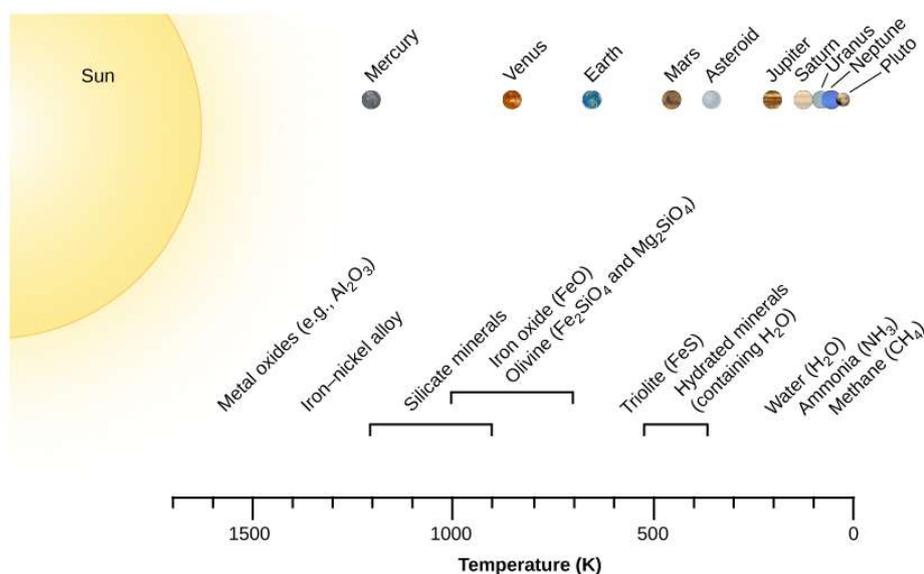


Figura 7.18: Sequência de condensação química na nebulosa solar. A escala na parte inferior mostra a temperatura; acima estão os materiais que se condensariam em cada temperatura sob as condições esperadas para prevalecer na nebulosa.

Longe do Sol, as temperaturas mais baixas permitiram que o oxigênio se combinasse com o hidrogênio e se condensasse na forma de água (H₂O) gelo. Além da órbita de Saturno, o carbono e o nitrogênio combinaram-se com o hidrogênio para formar gelos como metano (CH₄) e amônia (NH₃). Essa sequência de eventos explica as diferenças básicas de composição química entre várias regiões do sistema solar.

FORMAÇÃO DOS PLANETAS TERRESTRES

Os grãos que se condensaram na nebulosa solar rapidamente se juntaram em pedaços cada vez maiores, até que a maior parte do material sólido estava na forma de *planetesimais*, pedaços de alguns quilômetros a algumas dezenas de quilômetros de diâmetro. Alguns planetesimais ainda sobrevivem hoje como cometas e asteroides. Outros deixaram sua marca nas superfícies de crateras de muitos dos mundos que estudamos nos capítulos anteriores. No entanto, é necessário um aumento substancial de tamanho para ir de planetesimal a planeta.

Alguns planetesimais eram grandes o suficiente para atrair seus vizinhos gravitacionalmente e assim crescer pelo processo chamado de **acrecção**. Embora as etapas intermediárias não sejam bem compreendidas, várias dezenas de centros de acreção parecem ter crescido no interior do sistema solar. Cada um deles atraiu planetesimais circundantes até adquirir uma massa semelhante à de Mercúrio ou Marte. Nesta fase, podemos pensar nesses objetos como *protoplanetas* – planetas “ainda não prontos para o horário nobre”.

Cada um desses protoplanetas continuou a crescer pela acreção de planetesimais. Cada planetesimal que chegava era acelerado pela gravidade do protoplaneta, atingindo com energia suficiente para derreter o projétil e uma parte da área de impacto. Logo todo o protoplaneta foi aquecido acima da temperatura de fusão das rochas. O resultado foi a *diferenciação planetária*, com metais mais pesados afundando em direção ao núcleo e silicatos mais leves subindo em direção à superfície. À medida que eram aquecidos, os protoplanetas internos perdiam alguns de seus constituintes mais voláteis (os gases mais leves), deixando para trás mais elementos e compostos mais pesados.

FORMAÇÃO DOS PLANETAS GIGANTES

No sistema solar externo, onde as matérias-primas disponíveis incluíam tanto gelo quanto rochas, os protoplanetas cresceram muito, com massas dez vezes maiores que a da

Terra. Esses protoplanetas do sistema solar externo eram tão grandes que eram capazes de atrair e reter o gás circundante. À medida que o hidrogênio e o hélio colapsavam rapidamente em seus núcleos, os planetas gigantes eram aquecidos pela energia da contração. Mas, embora esses planetas gigantes tenham ficado mais quentes do que seus irmãos terrestres, eles eram pequenos demais para elevar suas temperaturas e pressões centrais a ponto de as reações nucleares poderem começar (e são essas reações que nos dão nossa definição de estrela). Depois de brilhar em vermelho opaco por alguns milhares de anos, os planetas gigantes gradualmente resfriaram até seu estado atual (Figura 7.19).

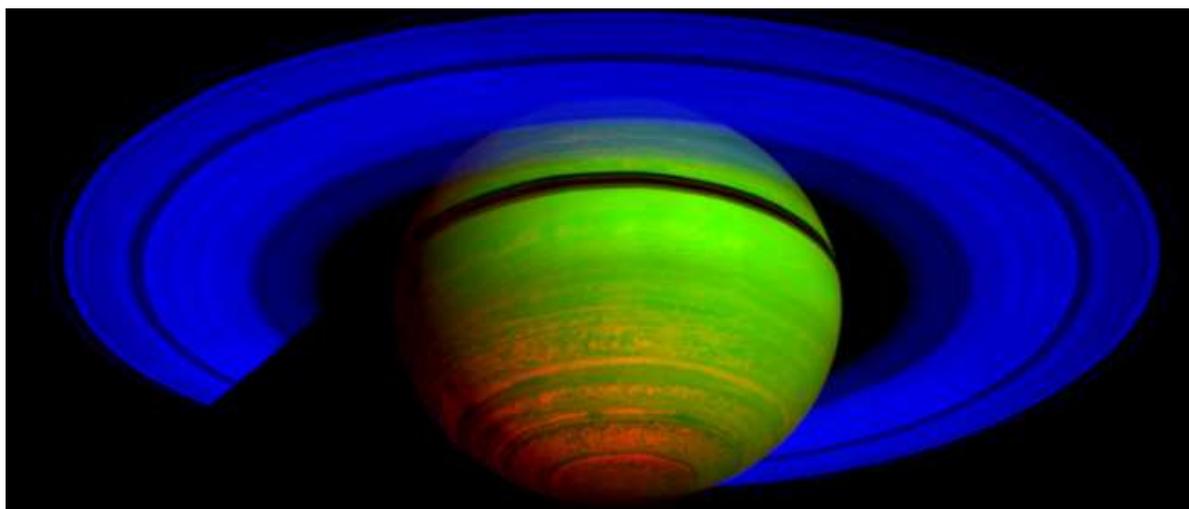


Figura 7.19: Saturno visto no infravermelho. Esta imagem da espaçonave Cassini é costurada a partir de 65 observações individuais. A luz solar refletida em um comprimento de onda de 2 micrômetros é mostrada em azul, a luz solar refletida em 3 micrômetros é mostrada em verde e o calor irradiado do interior de Saturno em 5 micrômetros é vermelho. Por exemplo, os anéis de Saturno refletem a luz solar em 2 micrômetros, mas não em 3 e 5 micrômetros, então eles aparecem em azul. As regiões polares do sul de Saturno são vistas brilhando com calor interno.

O colapso do gás da nebulosa nos núcleos dos planetas gigantes explica como esses objetos adquiriram quase a mesma composição rica em hidrogênio do Sol. O processo foi mais eficiente para Júpiter e Saturno; portanto, suas composições são quase "cósmicas". Muito menos gás foi capturado por Urano e Netuno, e é por isso que esses dois planetas têm composições dominadas pelos blocos de construção gelados e rochosos que compunham seus grandes núcleos, em vez de hidrogênio e hélio. O período inicial de formação terminou quando grande parte da matéria-prima disponível se esgotou e o vento solar (o fluxo de partículas atômicas) do jovem Sol soprou o suprimento restante de gases mais leves.

EVOLUÇÃO ADICIONAL DO SISTEMA

Todos os processos que acabamos de descrever, desde o colapso da nebulosa solar até a formação dos protoplanetas, ocorreram em alguns milhões de anos. Entretanto, a história da formação do sistema solar não estava completa neste estágio; havia muitos planetesimais e outros detritos que inicialmente não se acumularam para formar os planetas. Qual foi o destino deles?

Os cometas visíveis para nós hoje são apenas a ponta do iceberg cósmico (com o perdão do trocadilho). Acredita-se que a maioria dos cometas esteja na nuvem de Oort, longe da região dos planetas. Cometas adicionais e planetas anões gelados estão no cinturão de Kuiper, que se estende além da órbita de Netuno. Esses pedaços de gelo provavelmente se formaram perto das órbitas atuais de Urano e Netuno, mas foram ejetados de suas órbitas iniciais pela influência gravitacional dos planetas gigantes.

Nas partes internas do sistema, planetesimais remanescentes e talvez várias dezenas de protoplanetas continuaram a zunir. Durante o vasto período de tempo que estamos discutindo, as colisões entre esses objetos eram inevitáveis. Impactos gigantesco neste estágio podem ter arrancado Mercúrio de parte de seu manto e crosta, revertido a rotação de Vênus e quebrado parte da Terra para criar a Lua (todos os eventos que discutimos em outros capítulos).

Impactos de menor escala também adicionaram massa aos protoplanetas internos. Como a gravidade dos planetas gigantes pode “agitar” as órbitas dos planetesimais, o material que impacta os protoplanetas internos pode ter vindo de quase qualquer lugar dentro do sistema solar. Em contraste com o estágio anterior de acréscimo, portanto, esse novo material não representava apenas uma faixa estreita de composições.

Como resultado, muitos dos detritos que atingiram os planetas internos eram materiais ricos em gelo que se condensaram na parte externa da nebulosa solar. À medida que esse bombardeio semelhante a um cometa avançava, a Terra acumulava água e vários compostos orgânicos que mais tarde seriam essenciais para a formação da vida. Marte e Vênus provavelmente também adquiriram água abundante e materiais orgânicos da mesma fonte, como Mercúrio e a Lua ainda estão fazendo para formar suas calotas polares geladas.

Gradualmente, à medida que os planetas varriam ou ejetavam os detritos remanescentes, a maioria dos planetesimais desapareceu. Em duas regiões, no entanto, órbitas estáveis são possíveis onde os planetesimais restantes poderiam evitar o impacto dos planetas ou

serem ejetados do sistema. Essas regiões são o cinturão de asteroides entre Marte e Júpiter e o cinturão de Kuiper além de Netuno. Os planetesimais (e seus fragmentos) que sobrevivem nesses locais especiais são o que hoje chamamos de asteroides, cometas e objetos transnetunianos.

Os astrônomos costumavam pensar que o sistema solar que surgiu dessa evolução inicial era semelhante ao que vemos hoje. Estudos recentes detalhados das órbitas dos planetas e asteroides, no entanto, sugerem que houve eventos mais violentos logo depois, talvez envolvendo mudanças substanciais nas órbitas de Júpiter e Saturno. Esses dois planetas gigantes controlam, por meio de sua gravidade, a distribuição dos asteroides. Trabalhando para trás a partir do nosso atual sistema solar, parece que as mudanças orbitais ocorreram durante as primeiras centenas de milhões de anos. Uma consequência pode ter sido a dispersão de asteroides no interior do sistema solar, causando o período de “pesado bombardeio” registrado nas crateras lunares mais antigas.

COMPARAÇÃO COM OUTROS SISTEMAS PLANETÁRIOS

Até meados da década de 1990, o estudo prático da origem dos planetas concentrava-se em nosso único exemplo conhecido — o sistema solar. Embora houvesse muita especulação sobre planetas orbitando outras estrelas, nenhum havia sido realmente detectado. Logicamente, na ausência de dados, a maioria dos cientistas assumiu que nosso próprio sistema provavelmente seria típico. Eles tiveram uma grande surpresa.

DESCOBERTA DE OUTROS SISTEMAS PLANETÁRIOS

Em “O Nascimento das Estrelas e a Descoberta dos Planetas Fora do Sistema Solar”, discutimos a formação de estrelas e planetas com algum detalhe. Estrelas como o nosso Sol são formadas quando regiões densas em uma nuvem molecular (feita de gás e poeira) sentem uma força gravitacional extra e começam a entrar em colapso. Este é um processo descontrolado: à medida que a nuvem colapsa, a força gravitacional fica mais forte, concentrando o material em uma protoestrela. Aproximadamente na metade do tempo, a protoestrela se fragmentará ou será ligada gravitacionalmente a outras protoestrelas, formando um sistema estelar binário ou múltiplo — estrelas que são ligadas gravitacionalmente e orbitam umas às outras. No resto do tempo, a protoestrela colapsa isoladamente, como foi o caso do nosso Sol. Em todos os casos, como vimos, a conservação

do momento angular resulta em um spin-up da protoestrela em colapso, com o material circundante achatado em um disco. Hoje, esse tipo de estrutura pode realmente ser observado, discos circunstelares em regiões do espaço onde as estrelas estão nascendo hoje, como a Nebulosa de Orion (Figura 7.20) ou a região de formação estelar de Touro.

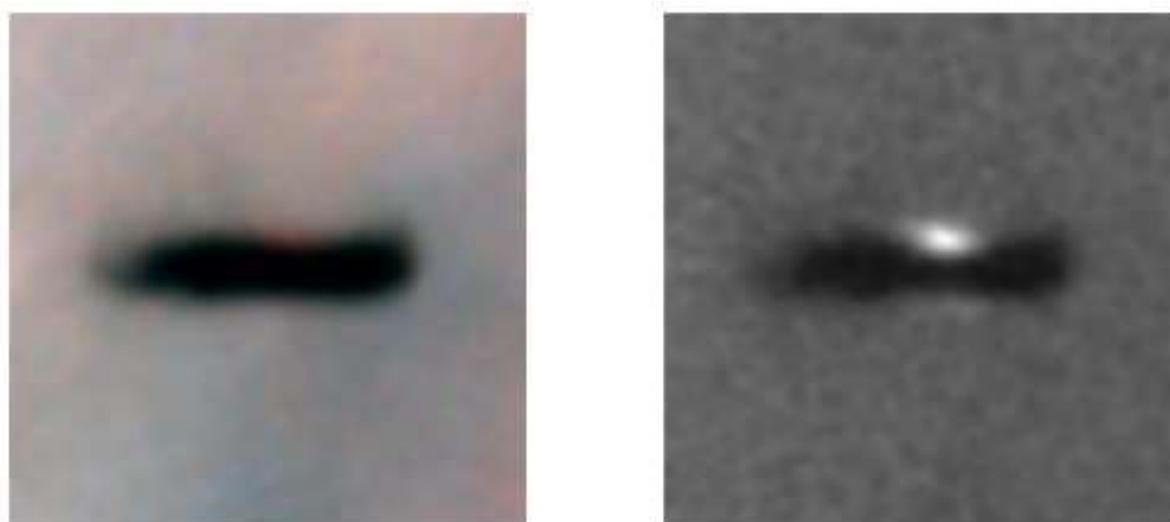
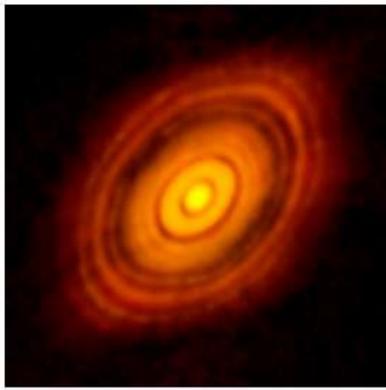


Figura 7.20: Disco protoplanetário na Nebulosa de Orion. O Telescópio Espacial Hubble fotografou este disco protoplanetário na Nebulosa de Orion, uma região de formação estelar ativa, usando dois filtros diferentes. O disco, com cerca de 17 vezes o tamanho do nosso sistema solar, está voltado para nós, e a estrela recém-formada está brilhando no centro da nuvem de poeira achatada. As áreas escuras indicam absorção, não ausência de material. Na imagem da esquerda vemos a luz da nebulosa e a nuvem escura; na imagem da direita, um filtro especial foi usado para bloquear a luz da nebulosa de fundo. Você pode ver o gás acima e abaixo do disco definido para brilhar pela luz da estrela recém-nascida escondida pelo disco.

Muitos dos discos circunstelares que descobrimos mostram estrutura interna. Os discos parecem ter a forma de uma rosquinha, com lacunas perto da estrela. Essas lacunas indicam que o gás e a poeira no disco já colapsaram para formar grandes planetas (Figura 7.21). Os protoplanetas recém-nascidos são muito pequenos e fracos para serem vistos diretamente, mas o esgotamento de matérias-primas nas lacunas sugere a presença de algo invisível na parte interna do disco circunstellar – e esse algo é quase certamente um ou mais planetas. Modelos teóricos de formação de planetas, como o visto à direita na [Figura 14.15](#), há muito apoiam a ideia de que os planetas eliminariam lacunas à medida que se formassem em discos.



(a)



(b)

Figura 7.21: Disco protoplanetário em torno de HL Tau. (a) Esta imagem de um disco protoplanetário em torno de HL Tau foi obtida com o Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), que permite aos astrônomos construir imagens de rádio que rivalizam com as obtidas com luz visível. (b) Os planetas recém-formados que orbitam a estrela central eliminam as faixas de poeira em seus caminhos, exatamente como preveem nossos modelos teóricos. Esta simulação de computador mostra a pista vazia e as ondas de densidade espiral que resultam quando um planeta gigante está se formando dentro do disco. O planeta não é mostrado em escala.

Nossa figura mostra HL Tau, uma estrela “recém-nascida” de um milhão de anos na região de formação estelar de Touro. A estrela está incrustada em um manto de poeira e gás que obscurece nossa visão de luz visível de um disco circumstelar ao redor da estrela. Em 2014, os astrônomos obtiveram uma visão dramática do disco circumstelar HL Tau usando ondas milimétricas, que perfuram o casulo de poeira ao redor da estrela, mostrando faixas de poeira sendo esculpidas por vários protoplanetas recém-formados. À medida que a massa dos protoplanetas aumenta, eles viajam em suas órbitas a velocidades mais rápidas que a poeira e o gás no disco circumstelar. À medida que os protoplanetas atravessam o disco, seu alcance gravitacional começa a exceder sua área de seção transversal e eles se tornam muito eficientes em varrer material e crescer até abrirem uma lacuna no disco. A imagem da Figura 7.21 nos mostra que vários protoplanetas estão se formando no disco e que eles foram capazes de se formar mais rapidamente do que nossas ideias anteriores sugeriam - tudo no primeiro milhão de anos de formação estelar.

DESCOBERTO DE EXOPLANETAS

Você pode pensar que, com os telescópios e detectores avançados que os astrônomos têm hoje, eles poderiam obter imagens diretas de planetas em torno de estrelas próximas (que chamamos de **exoplanetas**). Isso provou ser extremamente difícil, no entanto, não apenas porque os exoplanetas são fracos, mas também porque geralmente se perdem no brilho intenso da estrela que orbitam. Conforme discutimos com mais detalhes em “O nascimento das estrelas e a descoberta de planetas fora do sistema solar”, as técnicas de detecção que funcionam melhor são indiretas: elas observam os efeitos do planeta na estrela que orbita, em vez de ver o próprio planeta.

A primeira técnica que rendeu muitas detecções de planetas é a espectroscopia estelar de altíssima resolução. O *efeito Doppler* permite aos astrônomos medir a *velocidade radial da estrela*: isto é, a velocidade da estrela, em nossa direção ou longe de nós, em relação ao observador. Se houver um planeta maciço em órbita ao redor da estrela, a gravidade do planeta faz com que a estrela oscile, alterando sua velocidade radial em uma quantidade pequena, mas detectável. A distância da estrela não importa, desde que seja brilhante o suficiente para obtermos espectros de alta qualidade.

As medições da variação na velocidade radial da estrela conforme o planeta gira em torno da estrela podem nos dizer a massa e o período orbital do planeta. Se houver vários planetas presentes, seus efeitos sobre a velocidade radial podem ser desvendados, de modo que todo o sistema planetário possa ser decifrado, desde que os planetas tenham massa suficiente para produzir um efeito Doppler mensurável.

Esta técnica de detecção é mais sensível a grandes planetas orbitando perto da estrela, uma vez que estes produzem a maior oscilação em suas estrelas. Ele tem sido usado em grandes telescópios terrestres para detectar centenas de planetas, incluindo um em torno de Próxima Centauri, a estrela mais próxima do Sol.

A segunda técnica indireta é baseada no leve escurecimento de uma estrela quando um de seus planetas *transita*, ou cruza a face da estrela, visto da Terra. Os astrônomos não veem o planeta, mas apenas detectam sua presença a partir de medições cuidadosas de uma mudança no brilho da estrela durante longos períodos de tempo. Se as pequenas quedas no brilho se repetirem em intervalos regulares, podemos determinar o período orbital do planeta. Pela quantidade de luz das estrelas obscurecida, podemos medir o tamanho do planeta.

Embora alguns trânsitos tenham sido medidos da Terra, a aplicação em larga escala dessa técnica de trânsito requer um telescópio no espaço, acima da atmosfera e de suas distorções nas imagens das estrelas. Foi aplicado com mais sucesso a partir do observatório espacial Kepler da NASA, que foi construído com o único propósito de “olhar” por 5 anos para uma única parte do céu, monitorando continuamente a luz de mais de 150.000 estrelas. O objetivo principal do Kepler era determinar a frequência de ocorrência de exoplanetas de diferentes tamanhos em torno de diferentes classes de estrelas. Como a técnica Doppler, as observações de trânsito favorecem a descoberta de grandes planetas e órbitas de curto período. As observações do Kepler foram encerradas em 2018, quando a espaçonave ficou sem combustível necessário para apontar o telescópio.

A detecção recente de exoplanetas usando as técnicas Doppler e de trânsito tem sido incrivelmente bem-sucedida. Em duas décadas, passamos de nenhum conhecimento de outros sistemas planetários para um catálogo de *milhares* de exoplanetas. A maioria dos exoplanetas encontrados até agora são mais massivos ou maiores que a Terra. Não é que análogos da Terra não existam. Em vez disso, a escassez de pequenos planetas rochosos é um viés observacional: planetas menores são mais difíceis de detectar.

As análises dos dados para corrigir tais vieses ou efeitos de seleção indicam que planetas pequenos (como os planetas terrestres em nosso sistema) são na verdade muito mais comuns do que planetas gigantes. Também relativamente comuns são as “super-Terras”, planetas com duas a dez vezes a massa do nosso planeta (Figura 7.22). Não temos nenhum desses em nosso sistema solar, mas a natureza parece não ter problemas para produzi-los em outros lugares. No geral, os dados do Kepler sugerem que aproximadamente um quarto das estrelas possuem sistemas exoplanetários, implicando a existência de pelo menos 50 bilhões de planetas somente em nossa Galáxia.

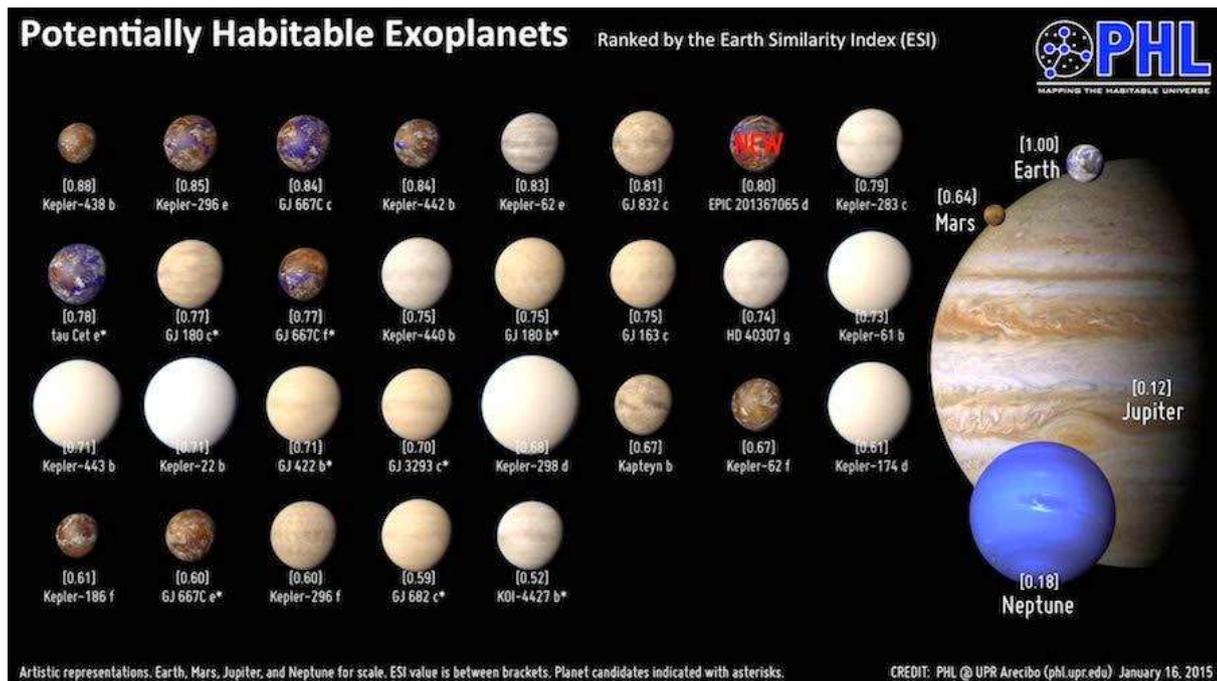


Figura 7.22: Exoplanetas: Super Terras.

PERSONALIDADES RECENTES DA ASTRONOMIA

Carl Sagan: defensor do sistema solar

O astrônomo mais conhecido do mundo durante as décadas de 1970 e 1980, Carl Sagan (ver Fig. 7.17) foi um cientista, físico, cosmólogo, escritor, divulgador científico e ativista norte-americano. Sagan é autor de mais de 600 publicações científicas e também de mais de vinte livros de ciência e ficção científica, incluindo o best-seller *Cosmos*. Seu livro *The Demon Haunted World*, concluído pouco antes de sua morte em 1996, é talvez o melhor antídoto para o pensamento confuso sobre pseudociência e irracionalidade impresso hoje. Um intrigante romance de ficção científica que ele escreveu, intitulado *Contact*, que também se tornou um filme de sucesso, ainda é recomendado por muitos instrutores de ciências como um cenário para fazer contato com a vida em outros lugares que é muito mais razoável do que a maioria da ficção científica.

Foi durante a vida um grande defensor do ceticismo e do uso do método científico. Promoveu a busca por inteligência extraterrestre através do projeto SETI e instituiu o envio de mensagens a bordo de sondas espaciais, destinadas a informar possíveis civilizações extraterrestres sobre a existência humana. Mediante suas observações da atmosfera de Vênus, foi um dos primeiros cientistas a estudar o efeito estufa em escala planetária. Também fundou a organização não governamental Sociedade Planetária e foi

pioneiro no ramo da exobiologia. Sagan passou grande parte da carreira como professor da Universidade Cornell, onde foi diretor do laboratório de estudos planetários. Em 1960 obteve o título de doutor pela Universidade de Chicago.

Nascido no Brooklyn, Nova York, em 1934, Sagan se interessou por astronomia ainda jovem.

No início dos anos 1960, quando muitos cientistas ainda pensavam que Vênus poderia se tornar um lugar hospitaleiro, Sagan calculou que a espessa atmosfera de Vênus poderia agir como uma estufa gigante, mantendo o calor e aumentando enormemente a temperatura. Ele mostrou que as mudanças sazonais que os astrônomos viram em Marte foram causadas, não pela vegetação, mas pela poeira trazida pelo vento. Ele foi membro das equipes científicas de muitas das missões robóticas que exploraram o sistema solar e foi fundamental para que a NASA colocasse uma placa com mensagens a bordo da espaçonave Pioneer, bem como registros de áudio e vídeo na espaçonave Voyager.

Sagan simulou condições na Terra primitiva para demonstrar como alguns dos blocos de construção fundamentais da vida podem ter se formado a partir da “sopa primordial” de compostos naturais em nosso planeta. Além disso, ele e seus colegas desenvolveram modelos de computador mostrando que as consequências da guerra nuclear para a Terra seriam ainda mais devastadoras do que se pensava (agora chamada de hipótese do inverno nuclear) e demonstrando algumas das graves consequências da poluição contínua de nossa atmosfera.

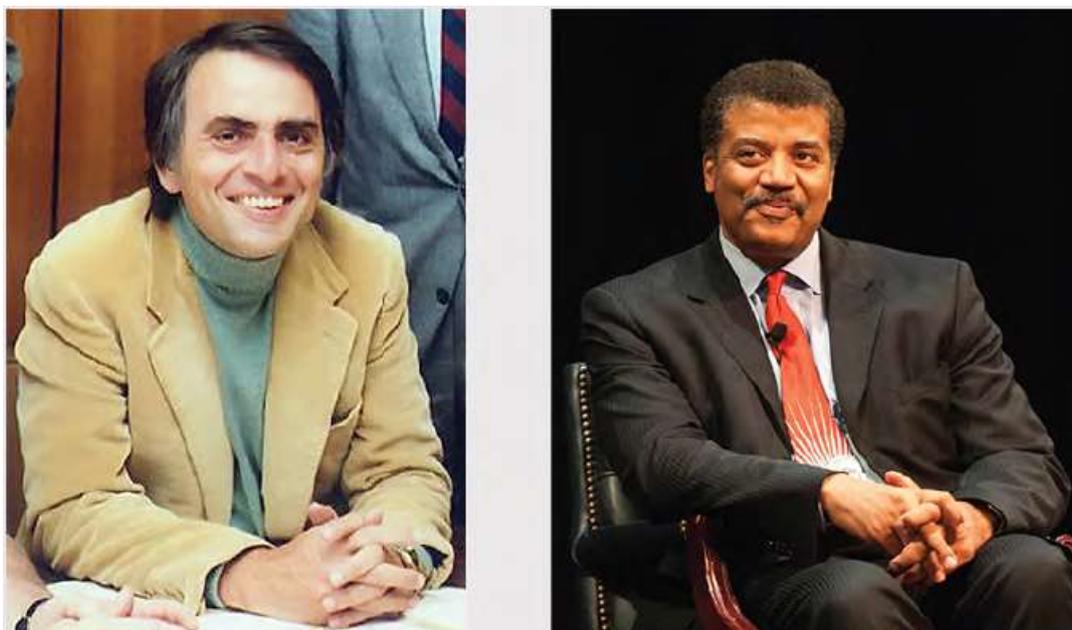
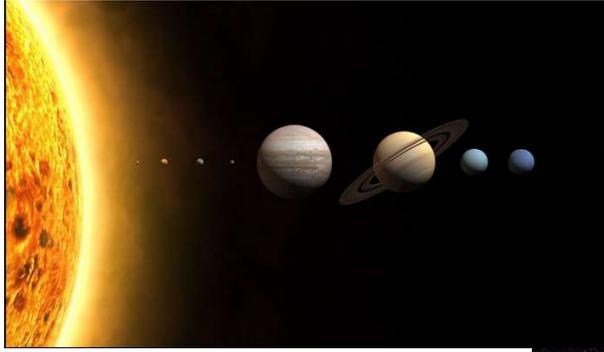


Figura 7.17: Carl Sagan (1934-1996) e Neil deGrasse Tyson. Sagan foi a inspiração de Tyson para se tornar um cientista.

Nas duas décadas desde a morte de Sagan, nenhum outro cientista alcançou o mesmo nível de reconhecimento público. Talvez mais próximo seja o diretor do Planetário Hayden, Neil deGrasse Tyson, que seguiu os passos de Sagan ao fazer uma versão atualizada do programa Cosmos em 2014. Tyson é rápido em apontar que Sagan foi sua inspiração para se tornar um cientista, contando como Sagan convidou-o para passar um dia em Cornell quando ele era um estudante do ensino médio em busca de uma carreira. No entanto, o ambiente da mídia se fragmentou muito desde a época de Sagan. É interessante especular se Sagan poderia ter adaptado seu estilo de comunicação ao mundo da televisão a cabo, Twitter, Facebook e podcasts.



UMA INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA

Prof. Dr. Fernando R de Paula
Departamento de Física e Química

Ilha Solteira 2024



8 A TERRA COMO UM PLANETA

Os mundos sem o ar que podemos respirar em nosso sistema solar parecem salpicados de crateras grandes e pequenas. A Terra, por outro lado, tem poucas crateras, mas uma atmosfera espessa e muita atividade superficial. Embora os impactos tenham ocorrido na Terra na mesma proporção, as crateras foram apagadas por forças na crosta e na atmosfera do planeta. O que a comparação entre as óbvias e persistentes crateras em tantos outros mundos e a aparência diferente da Terra pode nos dizer sobre a história do nosso planeta? Como nosso primeiro passo para explorar o sistema solar com mais detalhes, nos voltamos para o planeta mais familiar, nossa própria Terra. Os primeiros humanos a ver a Terra como uma esfera azul flutuando na escuridão do espaço foram os astronautas que fizeram a primeira viagem ao redor da Lua em 1968. Para muitas pessoas, as imagens históricas que mostram nosso mundo como um globo pequeno e distante representam um momento crucial na história humana, quando se tornou difícil para seres humanos instruídos ver nosso mundo sem uma perspectiva global.



Figura 8.1: Bola de gude azul (*Blue Marble*). Esta imagem da Terra vista do espaço, feita pelos astronautas da Apollo 17, é conhecida como “Mármore Azul”. Esta é uma das raras imagens de uma Terra cheia tiradas durante o programa Apollo; a maioria das imagens mostra apenas parte do disco da Terra à luz do sol.

8.1 PERSPECTIVA GLOBAL

A Terra é um planeta de tamanho médio com um diâmetro de aproximadamente 12.760 quilômetros (Fig. 8.1). Como um dos planetas internos ou terrestres, é composto principalmente de elementos pesados, como ferro, silício e oxigênio - muito diferente da composição do Sol e das estrelas, que são dominadas pelos elementos leves hidrogênio e hélio. A órbita da Terra é quase circular e a Terra é quente o suficiente para suportar água líquida em sua superfície. É o único planeta em nosso sistema solar que não é nem muito quente nem muito frio, mas “perfeito” para o desenvolvimento da vida como a conhecemos. Algumas das propriedades básicas da Terra estão resumidas na Tab. 8.1.

Tabela 8.1: Algumas propriedades da Terra

Propriedades	Medidas
Semieixo maior	1,00 UA
Período	1,00 anos
Massa	$5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$
Diâmetro	12.756 km
Raio	6.378 km
Velocidade de escape	11.2 km/s
Período de rotação	23h 56m 4s
Área superficial	$5,1 \times 10^8 \text{ km}^2$
Densidade	$5,514 \text{ g/cm}^3$
Pressão atmosférica	1,00 bar

O INTERIOR DA TERRA

O interior de um planeta – até mesmo a nossa própria Terra – é difícil de estudar, e sua composição e estrutura devem ser determinadas indiretamente. Nossa única experiência direta é com a camada mais externa da crosta terrestre, uma camada de não mais do que alguns quilômetros de profundidade. É importante lembrar que, em muitos aspectos, sabemos menos sobre nosso próprio planeta 5 quilômetros abaixo de nossos pés do que sobre as superfícies de Vênus e Marte.

A Terra é composta em grande parte por metal e rochas de silicato. A maior parte deste material está em estado sólido, mas uma parte está quente o suficiente para ser derretida. A estrutura do material no interior da Terra foi investigada em detalhes consideráveis medindo a transmissão de ondas sísmicas através da Terra. São ondas que se espalham pelo interior da Terra a partir de terremotos ou locais de explosão.

As ondas sísmicas viajam através de um planeta como as ondas sonoras através de um sino tocado. Assim como as frequências sonoras variam de acordo com o material de que o sino é feito e como é construído, a resposta de um planeta depende de sua composição e estrutura. Ao monitorar as ondas sísmicas em diferentes locais, os cientistas podem aprender sobre as camadas pelas quais as ondas viajaram. Algumas dessas vibrações

viajam ao longo da superfície; outros passam diretamente pelo interior. Estudos sísmicos mostraram que o interior da Terra consiste em várias camadas distintas com diferentes composições, ilustradas na Figura 8.3. À medida que as ondas viajam através de diferentes materiais no interior da Terra, as ondas Detectar as ondas em uma rede de sismógrafos ajudam os cientistas a construir um modelo do interior da Terra, mostrando camadas líquidas e sólidas. Esse tipo de imagem sísmica não é diferente da usada no ultrassom, um tipo de imagem usado para ver o interior do corpo.

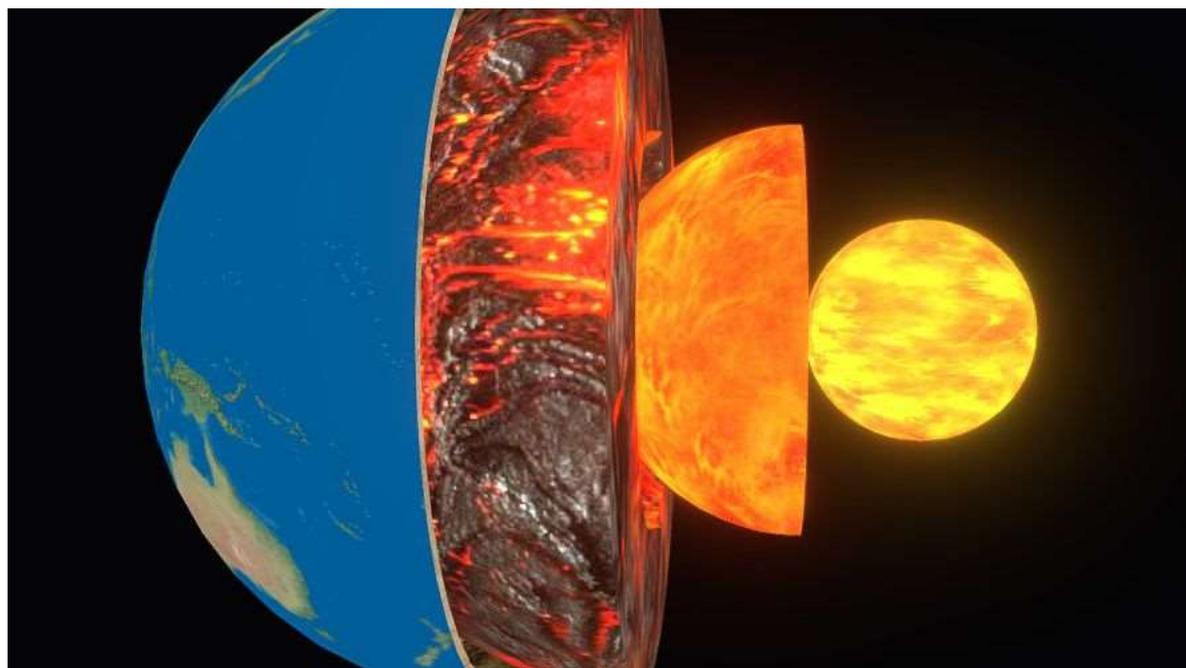


Figura 8.2: Estrutura Interna da Terra. A crosta, o manto e os núcleos interno e externo (líquido e sólido, respectivamente) conforme demonstrado por estudos sísmicos.

A camada superior é a crosta, a parte da Terra que conhecemos melhor (Fig. 8.3). A crosta oceânica cobre 55% da superfície da Terra e fica principalmente submersa sob os oceanos. Tem tipicamente cerca de 6 quilômetros de espessura e é composto de rochas vulcânicas chamadas basalto. Produzido pelo resfriamento da lava vulcânica, os basaltos são feitos principalmente dos elementos silício, oxigênio, ferro, alumínio e magnésio. A crosta continental cobre 45% da superfície, parte da qual também está abaixo dos oceanos. A crosta continental tem de 20 a 70 quilômetros de espessura e é composta predominantemente por uma classe vulcânica diferente de silicatos (rochas feitas de silício e oxigênio) chamado granito. Essas rochas crustais, tanto oceânicas quanto continentais, normalmente têm densidades de cerca de 3 g/cm³. A crosta é a camada mais fácil para os geólogos estudarem, mas representa apenas cerca de 0,3% da massa total da Terra.



Figura 8.3: Crosta terrestre. Esta imagem gerada por computador mostra a superfície da crosta terrestre determinada a partir de imagens de satélite e mapeamento de radar do fundo do oceano. Oceanos e lagos são mostrados em azul, com áreas mais escuras representando a profundidade. A terra seca é mostrada em tons de verde e marrom, e as camadas de gelo da Groenlândia e da Antártida são representadas em tons de branco.

A maior parte da Terra sólida, chamada manto, se estende da base da crosta até uma profundidade de 2.900 quilômetros. O manto é mais ou menos sólido, mas nas temperaturas e pressões encontradas, a rocha do manto pode se deformar e fluir lentamente. A densidade no manto aumenta com a profundidade de cerca de $3,5 \text{ g/cm}^3$ para mais de $5,0 \text{ g/cm}^3$ como resultado da compressão produzida pelo peso do material sobrejacente. Amostras de material do manto superior são ocasionalmente ejetadas de vulcões, permitindo uma análise detalhada de sua química.

Começando a uma profundidade de 2.900 quilômetros, encontramos o denso núcleo metálico da Terra. Com um diâmetro de 7.000 quilômetros, nosso núcleo é substancialmente maior que todo o planeta Mercúrio. O núcleo externo é líquido, mas a parte mais interna do núcleo (cerca de 2.400 quilômetros de diâmetro) é provavelmente sólida. Além do ferro, o núcleo provavelmente também contém quantidades substanciais de níquel e enxofre, todos comprimidos e, portanto, possuindo uma densidade muito alta. A separação da Terra em camadas de diferentes densidades é um exemplo de diferenciação, o processo de classificar os principais componentes de um planeta por densidade. O fato de a Terra ser diferenciada sugere que já foi quente o suficiente para seu interior derreter, permitindo que os metais mais pesados afundassem no centro e

formassem o núcleo denso. A evidência para a diferenciação vem da comparação da densidade aparente do planeta ($5,5 \text{ g/cm}^3$) com os materiais da superfície ($3,0 \text{ g/cm}^3$) para sugerir que o material mais denso deve estar no núcleo.

CAMPO MAGNÉTICO E MAGNETOSFERA

Podemos encontrar pistas adicionais sobre o interior da Terra a partir de seu campo magnético. Nosso planeta se comporta de certa forma como se uma barra magnética gigante estivesse dentro dele, alinhada aproximadamente com os pólos rotacionais da Terra. Este campo magnético é gerado pelo material em movimento no núcleo metálico líquido da Terra. À medida que o metal líquido dentro da Terra circula, ele cria uma corrente elétrica circulante. Quando muitas partículas carregadas estão se movendo elas produzem um campo magnético.

O campo magnético da Terra se estende para o espaço circundante. Quando uma partícula carregada encontra um campo magnético no espaço, ela fica presa na zona magnética. Acima da atmosfera da Terra, nosso campo é capaz de capturar pequenas quantidades de elétrons e outras partículas atômicas. Essa região, chamada de magnetosfera, é definida como a zona dentro da qual o campo magnético da Terra domina sobre o fraco campo magnético interplanetário que se estende para fora do Sol (Fig. 8.4).

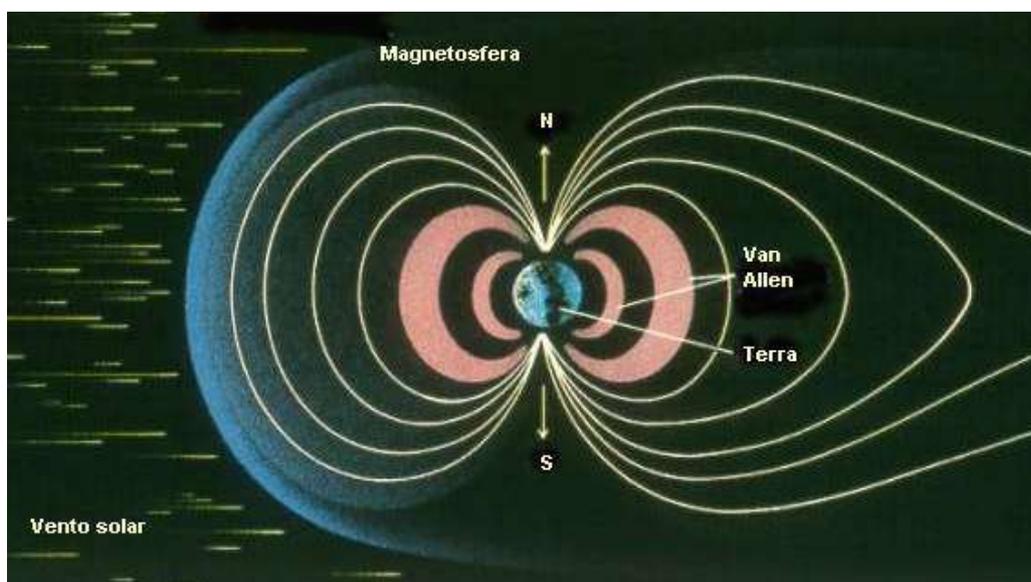


Figura 8.4: Magnetosfera da Terra. Uma visão transversal da nossa magnetosfera (ou zona de influência magnética), conforme revelado por inúmeras missões de naves espaciais. Observe como o vento de partículas carregadas do Sol “sopra” o campo magnético para fora como uma meia de vento.

De onde vêm as partículas carregadas presas em nossa magnetosfera? Eles fluem para fora da superfície quente do Sol; isso é chamado de vento solar. Ele não apenas fornece partículas para o campo magnético da Terra prender, mas também estica nosso campo na direção que aponta para longe do Sol. Normalmente, a magnetosfera da Terra se estende por cerca de 60.000 quilômetros, ou 10 raios terrestres, na direção do Sol. Mas, na direção oposta ao Sol, o campo magnético pode chegar até a órbita da Lua e, às vezes, mais longe. A magnetosfera foi descoberta em 1958 por instrumentos do primeiro satélite terrestre dos EUA, o Explorer 1, que registrou os íons (partículas carregadas) presos em sua parte interna. As regiões de íons de alta energia na magnetosfera são frequentemente chamadas de cinturões de Van Allen em reconhecimento ao professor da Universidade de Iowa que construiu a instrumentação científica para o Explorer 1. Desde 1958, centenas de naves espaciais exploraram várias regiões da magnetosfera.

A ATMOSFERA DA TERRA

Vivemos no fundo do oceano de ar que envolve nosso planeta. A atmosfera, pesando sobre a superfície da Terra sob a força da gravidade, exerce uma pressão ao nível do mar que os cientistas definem como 1 bar (termo que vem de barômetro, instrumento usado para medir a pressão atmosférica). Um bar de pressão significa que cada centímetro quadrado da superfície da Terra tem um peso equivalente a 1,03 quilogramas pressionando-o. Os humanos evoluíram para viver sob essa pressão.

A massa total da atmosfera da Terra é de cerca de $5 \times 10^{18} \text{ kg}$. Isso soa como um grande número, mas é apenas cerca de um milionésimo da massa total da Terra.

ESTRUTURA DA ATMOSFERA

A estrutura da atmosfera é ilustrada na Fig. 8.5. A maior parte da atmosfera está concentrada perto da superfície da Terra, a cerca de 10 quilômetros abaixo, onde as nuvens se formam e os aviões voam. Dentro dessa região, chamada troposfera o ar quente, aquecido pela superfície, sobe e é substituído por correntes descendentes de ar mais frio; este é um exemplo de convecção. Essa circulação gera nuvens e vento. Dentro da troposfera, a temperatura diminui rapidamente com o aumento da elevação para valores próximos de 50°C abaixo de zero em seu limite superior, onde a estratosfera começa. A

maior parte da estratosfera, que se estende até cerca de 50 quilômetros acima da superfície, é fria e livre de nuvens.

A Fig. 8.6 mostras de forma simplifica as diferentes ocupações dos aparatos humanos nas diferentes camadas da atmosfera.

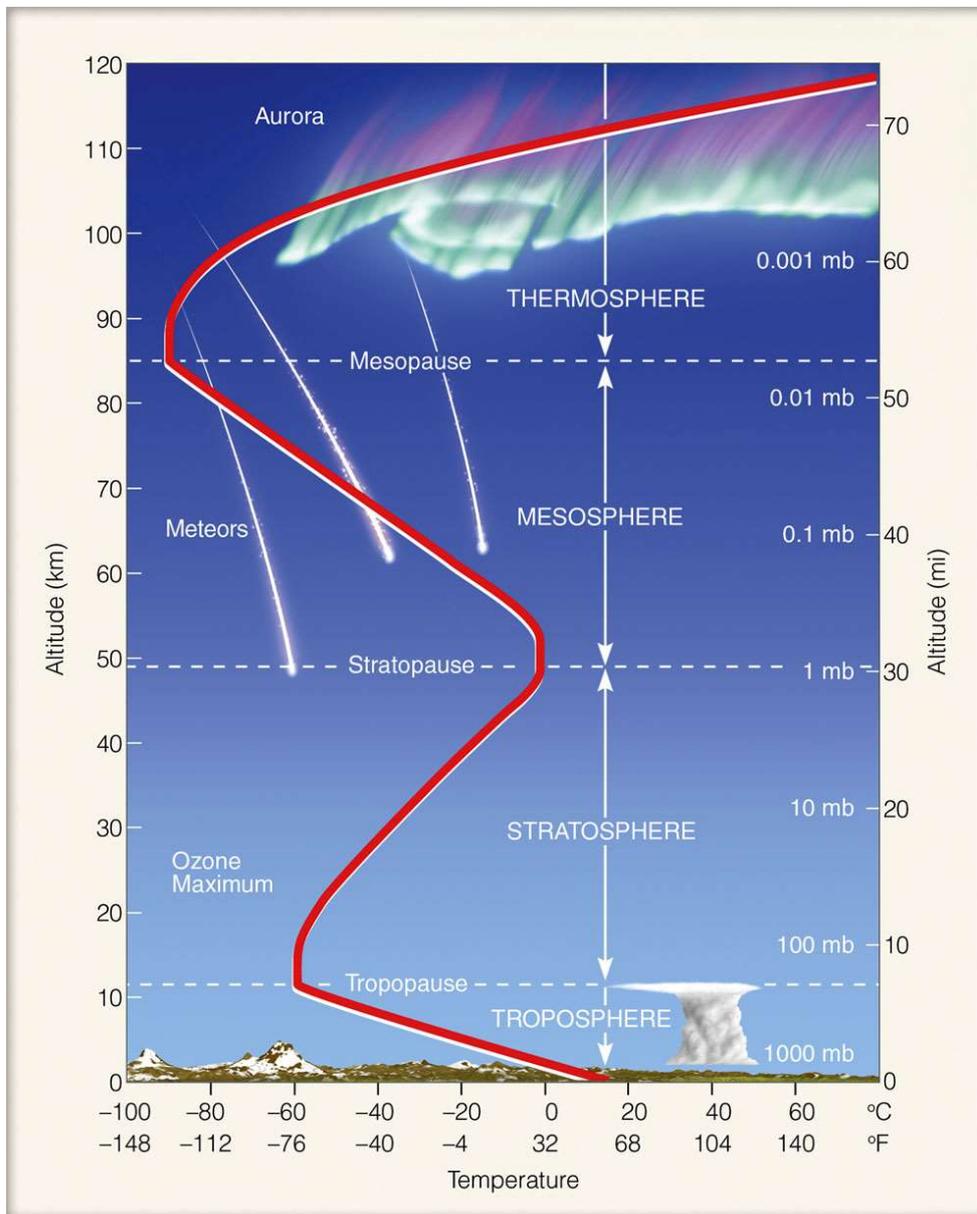


Figura 8.5: Estrutura da Atmosfera da Terra. Na ionosfera superior, a radiação ultravioleta do Sol pode retirar elétrons de seus átomos, deixando a atmosfera ionizada. A linha vermelha curva mostra a temperatura.

AS CAMADAS DA ATMOSFERA

EXOSFERA

É a última camada da atmosfera, na fronteira com o espaço sideral. Nela, as moléculas tornam-se cada vez mais rarefeitas, libertando-se da gravidade terrestre. O final da exosfera pode chegar a 600 km e 2.000 °C. As medições indicam que a temperatura dessa região fique em torno de 1.600 °C.

TERMOSFERA

Camada mais extensa da atmosfera, ela parte dos 90 e chega aos 600 quilômetros de altitude. Também é a mais quente: na parte superior, chega a 2.000 °C. É nessa faixa que orbitam os ônibus espaciais.

MESOSFERA

A camada mais fria da atmosfera fica entre 50 e 90 quilômetros de altitude. Sua temperatura diminui conforme subimos: parte de -15 °C na divisa com a estratosfera e chega a -120 °C. É onde ocorrem as estrelas cadentes.

ESTRATOSFERA

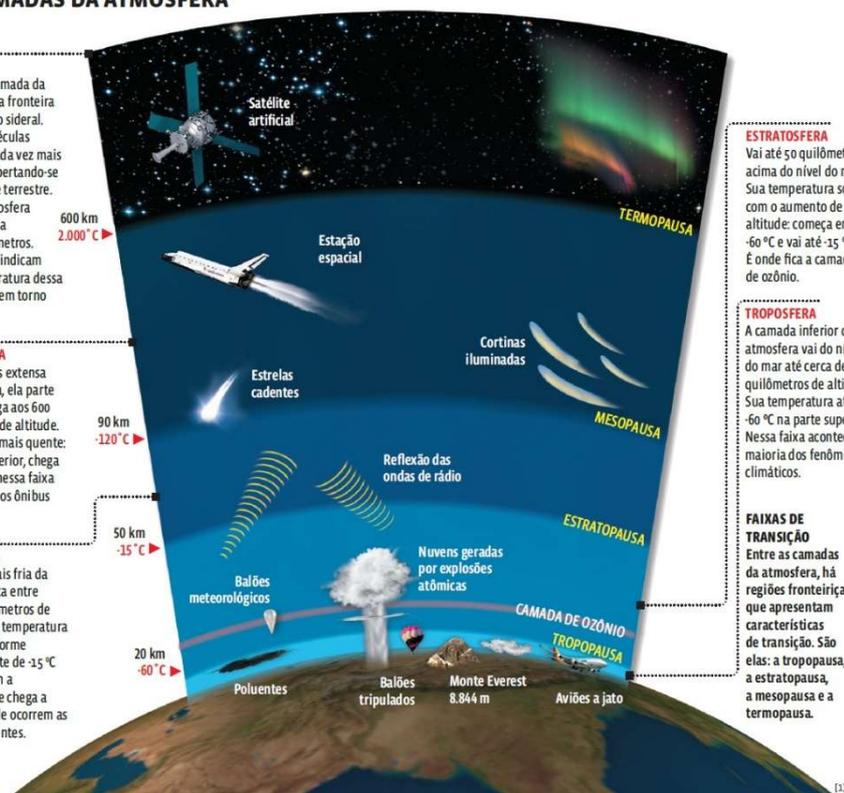
Vai até 50 quilômetros acima do nível do mar. Sua temperatura sobe com o aumento de altitude: começa em -60 °C e vai até -15 °C. É onde fica a camada de ozônio.

TROPOSFERA

A camada inferior da atmosfera vai do nível do mar até cerca de 12 quilômetros de altitude. Sua temperatura atinge -60 °C na parte superior. Nessa faixa acontece a maioria dos fenômenos climáticos.

FAIXAS DE TRANSIÇÃO

Entre as camadas da atmosfera, há regiões fronteiriças que apresentam características de transição. São elas: a tropopausa, a estratopausa, a mesopausa e a termopausa.



A Figura 8.6: Diferentes ocupações dos aparatos humanos nas diferentes camadas da atmosfera

Perto do topo da estratosfera há uma camada de ozônio (O_3), uma forma pesada de oxigênio com três átomos por molécula em vez dos dois habituais. Como o ozônio é um bom absorvedor de luz ultravioleta, ele protege a superfície de algumas das perigosas radiações ultravioletas do Sol, possibilitando a existência de vida na Terra. A quebra do ozônio adiciona calor à estratosfera, revertendo a tendência de diminuição da temperatura na troposfera. Como o ozônio é essencial para nossa sobrevivência, reagimos com justificável preocupação à evidência que ficou clara na década de 1980 de que o ozônio atmosférico estava sendo destruído pelas atividades humanas. Por acordo internacional, a produção de produtos químicos industriais que causam destruição da camada de ozônio, chamados clorofluorcarbonos, ou CFCs, foi eliminada. Como resultado, a perda de ozônio parou e o “buraco de ozônio” sobre a Antártida está diminuindo gradualmente. Este é um exemplo de como uma ação internacional pode ajudar a manter a habitabilidade da Terra.

Em altitudes acima de 100 quilômetros, a atmosfera é tão fina que os satélites em órbita podem atravessá-la com muito pouco atrito. Muitos dos átomos são ionizados pela perda de um elétron, e essa região é frequentemente chamada de ionosfera. Nessas elevações, átomos individuais podem ocasionalmente escapar completamente do campo gravitacional da Terra.

Há uma perda (vazamento) contínuo e lento da atmosfera, especialmente de átomos leves, que se movem mais rápido que os pesados. A atmosfera da Terra não pode, por exemplo, reter por muito tempo hidrogênio ou hélio, que escapam para o espaço. A Terra não é o único planeta a experimentar perda atmosférica. A perda atmosférica também criou a fina atmosfera de Marte. A atmosfera seca de Vênus evoluiu porque sua proximidade com o Sol vaporizou e dissociou qualquer molécula de água.

COMPOSIÇÃO E ORIGEM DA ATMOSFERA TERRESTRE

Na superfície da Terra, a atmosfera consiste em 78% de nitrogênio (N_2), 21% de oxigênio (O_2) e 1% de argônio (Ar), com traços de vapor de água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2) e outros gases. Quantidades variáveis de partículas de poeira e gotas de água também são encontradas suspensas no ar.

Um censo completo dos materiais voláteis da Terra, no entanto, deve considerar mais do que o gás que está agora presente.

Materiais voláteis são aqueles que evaporam a uma temperatura relativamente baixa. Se a Terra fosse um pouco mais quente, alguns materiais que agora são líquidos ou sólidos poderiam se tornar parte da atmosfera. Suponhamos, por exemplo, que nosso planeta fosse aquecido acima do ponto de ebulição da água (100 °C ou 373 K); essa é uma grande mudança para os humanos, mas uma pequena mudança em comparação com a faixa de temperaturas possíveis no universo. A 100 °C, os oceanos entrariam em ebulição e o vapor de água resultante tornar-se-ia parte da atmosfera.

Para estimar quanto vapor de água seria liberado, observe que há água suficiente para cobrir toda a Terra até uma profundidade de cerca de 300 metros. Como a pressão exercida por 10 metros de água é igual a cerca de 1 bar, a pressão média no fundo do oceano é de cerca de 300 bar. A água pesa o mesmo, seja na forma líquida ou em vapor, portanto, se os oceanos evaporassem, a pressão atmosférica da água ainda seria de 300 bar. A água, portanto, dominaria a atmosfera da Terra, com nitrogênio e oxigênio reduzidos a vestígios. Em uma Terra mais quente, outra fonte de atmosfera adicional seria encontrada nas rochas carbonáticas sedimentares da crosta. Esses minerais contêm dióxido de carbono abundante. Se todas essas rochas fossem aquecidas, liberariam cerca de 70 bar de CO_2 , muito mais do que a pressão atual de CO_2 de apenas 0,0005 bar. Assim, a atmosfera de uma Terra quente seria dominada por vapor de água e dióxido de carbono, com uma pressão superficial próxima de 400 bar.

Várias linhas de evidência mostram que a composição da atmosfera da Terra mudou ao longo da história do nosso planeta. Os cientistas podem inferir a quantidade de oxigênio atmosférico, por exemplo, estudando a química dos minerais que se formaram em vários momentos.

Hoje vemos que CO₂, H₂O, dióxido de enxofre (SO₂) e outros gases são liberados das profundezas da Terra através da ação dos vulcões. (Para o CO₂, a fonte primária hoje é a queima de combustíveis fósseis, que libera muito mais CO₂ do que as erupções vulcânicas. Muito desse gás aparentemente novo, no entanto, é material reciclado que foi subduzido (movimento convergente das placas tectônicas que se chocam, causando o afundamento da placa mais pesada a que chamamos de subducção e fazendo a placa mais leve ascender, a que chamamos de obducção) por placas tectônicas.

Mas de onde veio a atmosfera original do nosso planeta? Existem três possibilidades para a fonte original da atmosfera e dos oceanos da Terra:

- (1) a atmosfera pode ter sido formada com o resto da Terra à medida que se acumulou de detritos que sobraram da formação do Sol;
- (2) poderia ter sido liberado do interior por meio de atividade vulcânica, posterior à formação da Terra; ou
- (3) pode ter sido derivado de impactos de cometas e asteroides das partes externas do sistema solar. As evidências atuais favorecem uma combinação de (2) e (3).

INFLUÊNCIAS CÓSMICAS NA EVOLUÇÃO DA TERRA

Na Lua, em contraste, vemos principalmente crateras, produzidas pelos impactos de detritos interplanetários, como asteroides e cometas. Por que não vemos mais evidências na Terra dos tipos de crateras de impacto que são tão proeminentes na Lua e em outros mundos?

Não é possível que a Terra tenha escapado de ser atingida pelos detritos interplanetários que marcaram a Lua. De uma perspectiva cósmica, a Lua está quase ao lado. Nossa atmosfera faz pequenos pedaços de detritos cósmicos queimarem (que vemos como meteoros, comumente chamados de estrelas cadentes). Mas as camadas do nosso ar não fornecem proteção contra os grandes impactos que formam crateras com vários quilômetros de diâmetro e são comuns na Lua.

No curso de sua história, a Terra deve, portanto, ter sido atingida tão fortemente quanto a Lua. A diferença é que, na Terra, essas crateras são destruídas, em grande parte, por nossa geologia ativa. À medida que as placas tectônicas renovam constantemente nossa crosta, as

evidências de eventos passados de crateras são lentamente apagadas. Somente nas últimas décadas os geólogos conseguiram identificar os remanescentes erodidos de muitas crateras de impacto (Fig. 8.7). Ainda mais recente é a nossa percepção de que, ao longo da história da Terra, esses impactos tiveram uma influência importante na evolução da vida.

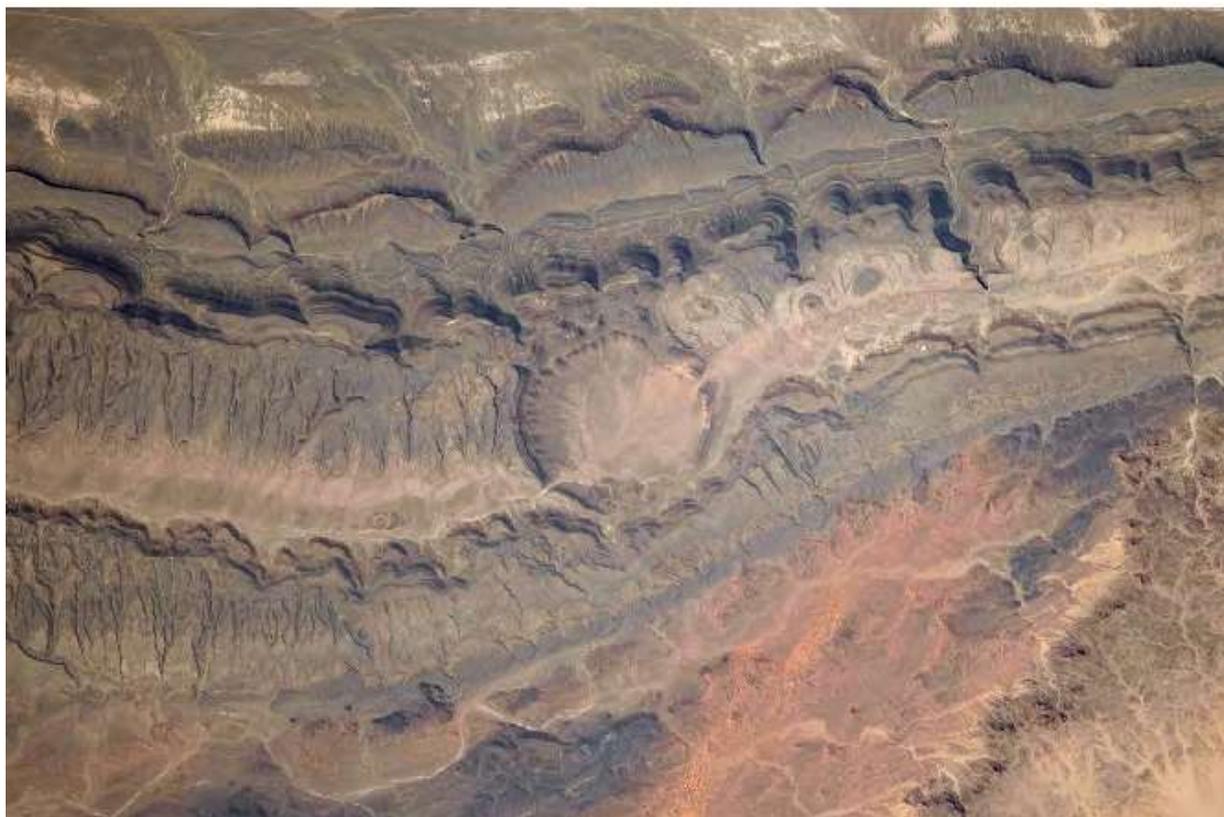


Figura 8.7: Cratera de Impacto Ouarkiz. Localizada na Argélia, esta cratera (a forma redonda no centro) é o resultado de um impacto de meteoro durante o período Cretáceo. Embora a cratera tenha sofrido forte erosão, esta imagem da Estação Espacial Internacional mostra o padrão circular resultante do impacto.

IMPACTOS RECENTES NA TERRA

A colisão de detritos interplanetários com a Terra não é uma ideia hipotética. Evidências de impactos relativamente recentes podem ser encontradas na superfície do nosso planeta. Uma colisão histórica bem estudada ocorreu em 30 de junho de 1908, perto do rio Tunguska, na Sibéria. Nesta região desolada, houve uma grande explosão na atmosfera cerca de 8 quilômetros acima da superfície. A onda de choque arrasou mais de mil quilômetros quadrados de floresta (Fig. 8.8). Rebanhos de renas e outros animais foram mortos, e um homem em um posto comercial a 80 quilômetros da explosão foi jogado de sua cadeira e ficou

inconsciente. A onda de choque se espalhou pelo mundo, conforme registrado por instrumentos projetados para medir mudanças na pressão atmosférica.



Figura 8.8: Consequências da Explosão de Tunguska. Apesar de ainda ser assunto de debate, segundo os estudos mais recentes a destruição provavelmente foi causada pelo deslocamento de ar subsequente a uma explosão de um meteoróide ou fragmento de cometa a uma altitude de 5 – 10 km na atmosfera, devido ao atrito da reentrada. Diferentes estudos resultaram em estimativas para o tamanho do objeto variando em torno de algumas dezenas de metros em decorrência de um meteorito.

Dezenas de milhares de pessoas testemunharam diretamente a explosão de um meteoro de 10.000 toneladas e de aproximadamente 17 metros sobre a cidade russa de Chelyabinsk em uma manhã de inverno em 2013. Ele explodiu a uma altura de 21 quilômetros em uma explosão de luz mais brilhante que o Sol e a onda de choque da explosão de 0,5 megaton quebrou dezenas de milhares de janelas e enviou centenas de pessoas para o hospital. Fragmentos de rocha (meteoritos) foram facilmente coletados por pessoas na área após a explosão porque caíram na neve fresca.

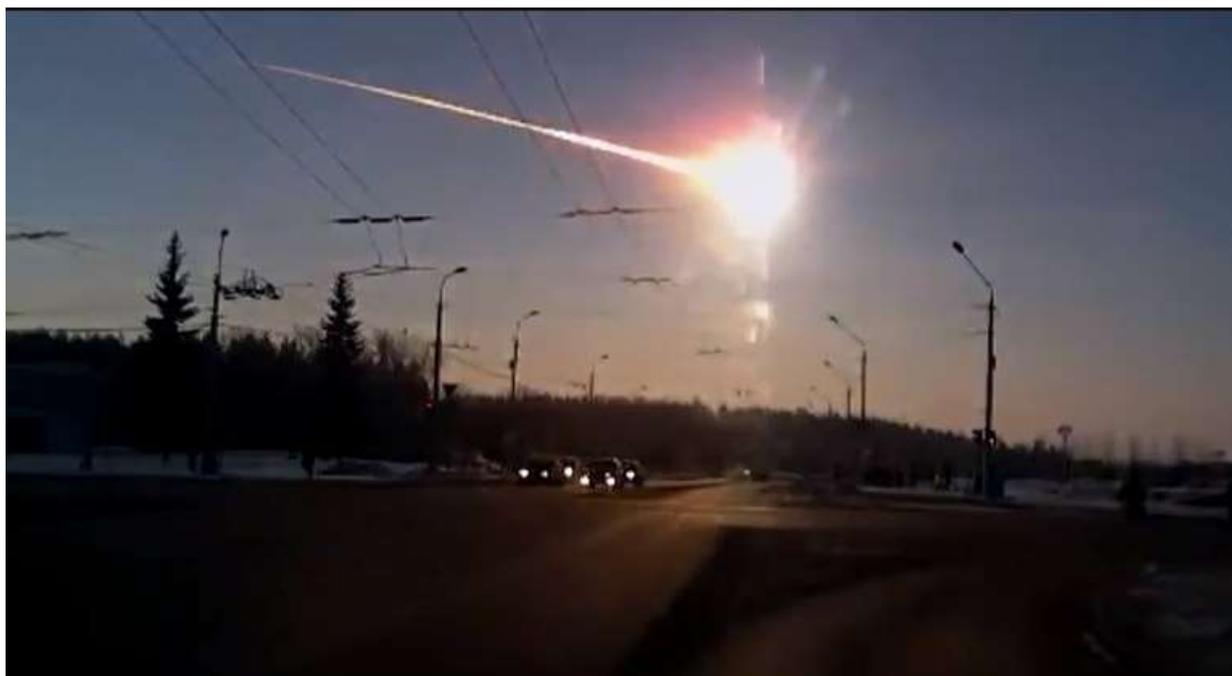


Figura 8.9: O meteoro de Chelyabinsk, ou meteoro de Chelyabinsk.

A cratera recente mais conhecida da Terra foi formada há cerca de 50.000 anos no Arizona. O projétil neste caso era um pedaço de ferro com cerca de 40 metros de diâmetro. Agora chamada de Meteor Crater é uma grande atração turística no caminho para o Grand Canyon.



Figura 8.10: Cratera do Meteoro no Arizona. Aqui vemos uma cratera de impacto de 50.000 anos feita pela colisão de um pedaço de ferro de 40 metros com o nosso planeta. Embora as crateras de impacto sejam comuns em corpos menos ativos, como a Lua, esta é uma das poucas crateras bem preservadas na Terra.

A cratera tem cerca de um quilômetro e meio de diâmetro e tem todas as características associadas a crateras de impacto lunar de tamanho semelhante (Fig. 8.10). A Cratera do Meteoro é uma das poucas características de impacto na Terra que permanece relativamente intacta; algumas crateras mais antigas estão tão erodidas que apenas um olho treinado pode distingui-las. No entanto, mais de 150 foram identificados.

EXTINÇÃO EM MASSA

O impacto que produziu a Cratera do Meteoro no Arizona teria sido realmente dramático para qualquer humano que o testemunhasse (de uma distância segura), já que a liberação de energia era equivalente a uma bomba nuclear de 10 megatons. Mas essas explosões são devastadoras apenas em suas áreas locais; eles não têm consequências globais. Impactos muito maiores (e mais raros), no entanto, podem perturbar o equilíbrio ecológico de todo o planeta e, assim, influenciar o curso da evolução.

O grande impacto mais bem documentado ocorreu há 65 milhões de anos, no final do que hoje é chamado de período Cretáceo da história geológica. Desta vez na história da vida na Terra foi marcada por uma extinção em massa, na qual mais da metade das espécies do nosso planeta morreram. Há uma dúzia ou mais de extinções em massa no registro geológico, mas esse evento em particular (apelidado de “grande morte”) sempre intrigou os paleontólogos porque marca o fim da era dos dinossauros. Por dezenas de milhões de anos essas grandes criaturas floresceram e dominaram. Então, eles desapareceram de repente (junto com muitas outras espécies) e, a partir de então, os mamíferos começaram o desenvolvimento e a diversificação que acabou levando a todos nós.

O objeto que colidiu com a Terra no final do período Cretáceo atingiu um mar raso no que hoje é a península de Yucatán, no México. Sua massa deve ter sido superior a um trilhão de toneladas, determinada a partir do estudo de uma camada mundial de sedimentos depositados da nuvem de poeira que envolveu o planeta após seu impacto. Identificada pela primeira vez em 1979, esta camada de sedimentos é rica no raro metal irídio e outros elementos que são relativamente abundantes em asteroides e cometas, mas extremamente raros na crosta terrestre. Mesmo diluído pelo material que a explosão escavou da superfície da Terra, esse componente cósmico ainda pode ser identificado. Além disso, essa camada de sedimentos contém muitos minerais característicos das temperaturas e pressões de uma explosão gigantesca.

O impacto que levou à extinção dos dinossauros liberou energia equivalente a 5 bilhões de bombas nucleares do tamanho de Hiroshima e escavou uma cratera de 200 quilômetros de diâmetro e profunda o suficiente para penetrar na crosta terrestre. Esta grande cratera, chamada Chicxulub foi enterrada, ao longo do tempo, por sedimentos, mas seus contornos ainda podem ser identificados (Fig. 8.11). A explosão que criou a cratera Chicxulub levantou cerca de 100 trilhões de toneladas de poeira na atmosfera. Podemos determinar essa quantidade medindo a espessura da camada de sedimentos que se formou quando essa poeira se assentou na superfície.

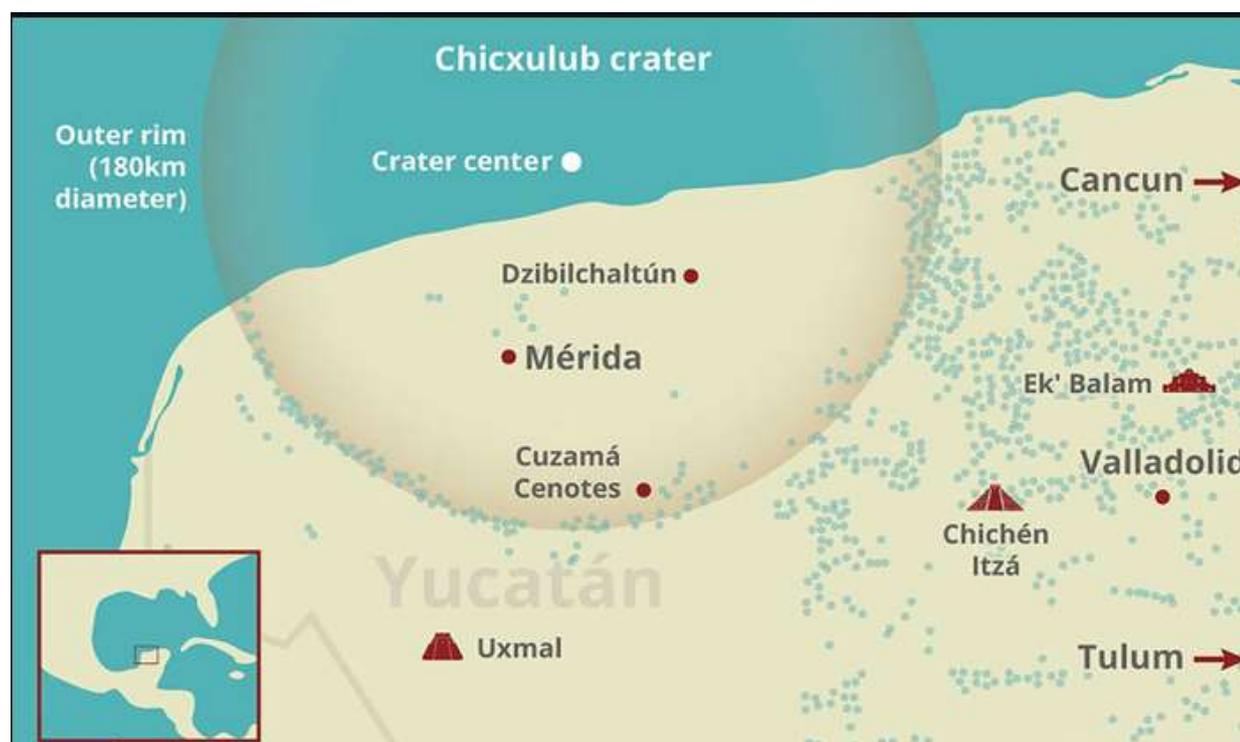


Figura 8.11: Local da Cratera Chicxulub. Este mapa mostra a localização da cratera de impacto criada há 65 milhões de anos na península mexicana de Yucatán. A cratera está agora enterrada sob mais de 500 metros de sedimentos.

Tal quantidade de material transportado pelo ar teria bloqueado a luz solar completamente, mergulhando a Terra em um período de frio e escuridão que durou vários meses. Muitas plantas dependentes da luz solar teriam morrido, deixando os animais herbívoros sem suprimento de comida. Outros efeitos mundiais incluíram incêndios em grande escala (iniciados pelos destroços quentes e deslocados a longas distâncias pela explosão) que destruíram grande parte das florestas e pastagens do planeta, e um longo período em que a água da chuva em todo o mundo era ácida. Foram esses efeitos ambientais, e não a própria

explosão, que foram responsáveis pela extinção em massa, incluindo o desaparecimento dos dinossauros.

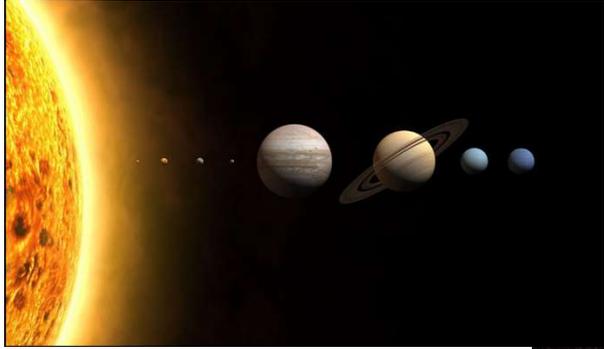
IMPACTOS NO NOSSO FUTURO?

Os impactos de asteroides e cometas que tiveram uma influência tão grande na vida não são necessariamente eventos do passado. Em todo o escopo da história planetária, 65 milhões de anos atrás foi apenas ontem. A Terra, na verdade, orbita o Sol dentro de uma espécie de galeria de tiro cósmica e, embora grandes impactos sejam raros, eles ainda não terminaram. A humanidade pode sofrer o mesmo destino que os dinossauros, ou perder uma cidade para os impactos muito mais frequentes como o de Tunguska, a menos que descubramos uma maneira de prever o próximo grande impacto e proteger nosso planeta.

O fato de nosso sistema solar abrigar alguns planetas muito grandes em órbitas externas pode ser benéfico para nós; os campos gravitacionais desses planetas podem ser muito eficazes em atrair detritos cósmicos e nos proteger de impactos maiores e mais frequentes.

A partir da década de 1990, alguns astrônomos começaram a analisar o risco de impacto cósmico e persuadir o governo a apoiar a busca de asteroides potencialmente perigosos. Vários pequenos, mas sofisticados, telescópios de campo amplo são agora usados para essa busca, que é chamada de NASA Spaceguard Survey. Já sabemos que atualmente não há asteroides em rota de colisão com a Terra que sejam tão grandes (10 a 15 quilômetros) quanto aquele que matou os dinossauros. O Spaceguard Survey agora se concentra em encontrar impactos menores em potencial.

Em 2015, a busca havia encontrado mais de 15.000 esteroides próximos à Terra, incluindo a maioria daqueles com mais de 1 quilômetro. Nenhum dos descobertos até agora representa qualquer perigo para nós. Claro, não podemos fazer uma declaração semelhante sobre os asteroides que ainda não foram descobertos, mas eles serão encontrados e avaliados como perigo potencial. Essas pesquisas de asteroides são um dos poucos projetos realmente de vida ou morte realizados por astrônomos, com potencial para ajudar a salvar nosso planeta de futuros grandes impactos.



UMA INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA

Prof. Dr. Fernando R de Paula
Departamento de Física e Química

Ilha Solteira 2024



9 MUNDOS CHEIOS DE CRATERAS

A Lua é o único outro mundo que os seres humanos já visitaram. Como é estar na superfície do nosso satélite natural? E o que podemos aprender indo até lá e trazendo para casa pedaços de um mundo diferente?

Começamos nossa discussão dos planetas como mundos cheios de crateras com dois objetos relativamente simples: a Lua e Mercúrio. Ao contrário da Terra, a Lua está geologicamente morta, um lugar que esgotou suas fontes internas de energia. Como sua superfície sem ar preserva eventos que aconteceram há muito tempo, a Lua fornece uma janela para épocas anteriores da história do sistema solar. O planeta Mercúrio é em muitos aspectos semelhante à Lua, e é por isso que os dois são discutidos juntos: ambos são relativamente pequenos, carentes de atmosferas, deficientes em atividade geológica e dominados pelos efeitos das crateras de impacto. Ainda assim, os processos que moldaram suas superfícies não são exclusivos desses dois mundos. Veremos que eles também atuaram em muitos outros membros do sistema planetário.

PROPRIEDADES GERAIS DA LUA

A Lua tem apenas um oitavo da massa da Terra e cerca de um sexto da gravidade da superfície da Terra – muito baixa para reter uma atmosfera (Fig. 9.1). Moléculas em movimento de um gás podem escapar de um planeta da mesma forma que um foguete faz, e quanto menor a gravidade, mais fácil é para o gás vazar para o espaço. Enquanto a Lua pode adquirir uma atmosfera temporária ao colidir com cometas, essa atmosfera é rapidamente perdida pelo congelamento na superfície ou pela fuga para o espaço circundante. A Lua hoje é dramaticamente deficiente em uma ampla gama de voláteis,

aqueles elementos e compostos que evaporam a temperaturas relativamente baixas. Algumas das propriedades da Lua estão resumidas na Tabela 9.1, juntamente com valores comparativos para Mercúrio.

Propriedades	Lua	Mercúrio
Massa (Terra = 1)	0,0123	0,055
Diâmetro (km)	3476	4878
Densidade (g/cm ³)	3,3	5,4
Gravidade (Terra = 1)	0,17	0,38
Velocidade de escape (km/s)	2,4	4,3
Período de rotação (dia)	27,30	58,65
Área superficial (Terra = 1)	0,27	0,38

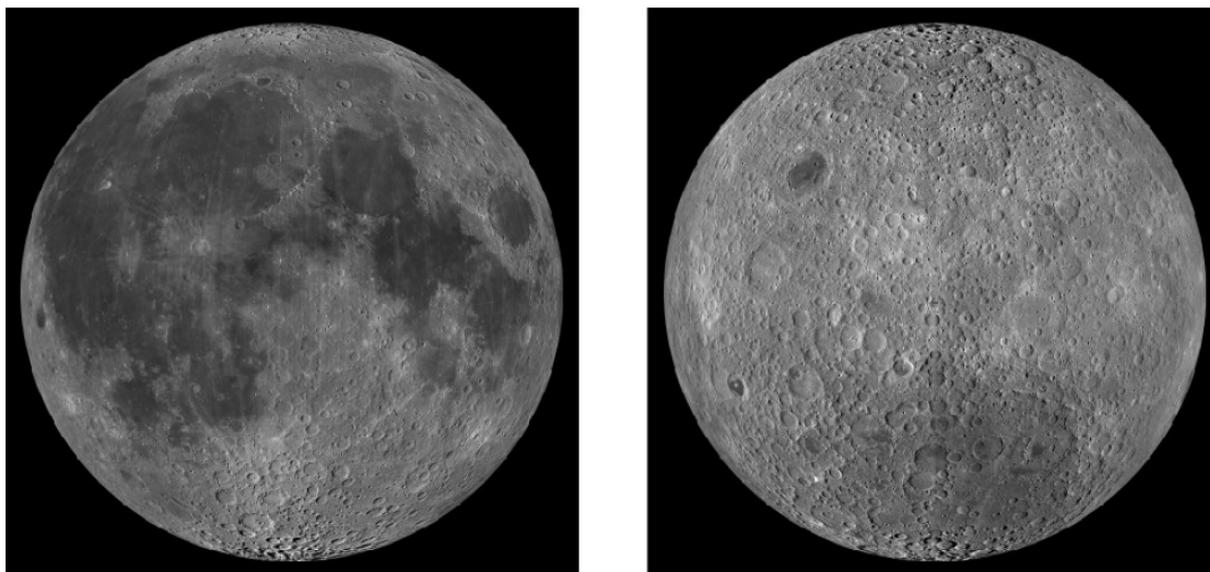


Figura 9.1: Dois Lados da Lua. A imagem da esquerda mostra parte do hemisfério voltado para a Terra; várias maria escuros são visíveis (as manchas escuras da lua são chamadas de "maria") A imagem da direita mostra parte do hemisfério que está de costas para a Terra; é dominado por terras altas. A resolução desta imagem é de vários quilômetros, semelhante à de binóculos de alta potência ou de um pequeno telescópio.

EXPLORAÇÃO DA LUA

A maior parte do que sabemos sobre a Lua hoje deriva do programa Apollo dos EUA, que enviou nove naves espaciais pilotadas ao nosso satélite entre 1968 e 1972, pousando 12 astronautas em sua superfície (Fig. 9.2). Antes da era dos estudos das naves espaciais, os astrônomos mapeavam o lado da Lua voltado para a Terra com resolução telescópica de

cerca de 1 quilômetro, mas a geologia lunar quase não existia como assunto científico. Tudo isso mudou a partir do início dos anos 1960. Inicialmente, a Rússia assumiu a liderança na exploração lunar com o Luna 3, que retornou as primeiras fotos do lado oculto lunar em 1959, e depois com o Luna 9, que pousou na superfície em 1966 e transmitiu imagens e outros dados para a Terra. No entanto, esses esforços foram ofuscados em 20 de julho de 1969, quando o primeiro astronauta americano pisou na Lua.



Figura 9.2: Cientista na Lua. O geólogo (e mais tarde senador dos EUA) Harrison “Jack” Schmitt em frente a uma grande pedra no Vale Littrow, na borda das terras altas lunares. Observe como o céu está escuro na Lua sem ar. Nenhuma estrela é visível porque a superfície é iluminada pelo Sol e, portanto, a exposição não é longa o suficiente para revelar estrelas.

O último humano deixou a Lua em dezembro de 1972, pouco mais de três anos depois que Neil Armstrong deu seu “salto gigante para a humanidade”.

Os foguetes Apollo gigantes construídos para viajar para a Lua foram deixados para enferrujar nos gramados dos centros da NASA na Flórida, Texas e Alabama, embora recentemente alguns tenham sido movidos para dentro de museus (Fig. 9.3). Hoje, nem a NASA nem a Rússia têm planos de enviar astronautas à Lua, e a China parece ser a nação mais propensa a tentar esse feito. (Em uma ironia bizarra, algumas pessoas até questionam se fomos à Lua, propondo que o programa Apollo era falso, filmado em um palco de Hollywood. No entanto, o interesse científico na Lua está mais forte do que nunca, e mais de meia dúzia de naves espaciais científicas - enviadas da NASA, ESA, Japão, Índia e China - orbitaram ou pousaram em nosso vizinho mais próximo durante a década passada.



Figura 9.3: Foguete lunar em exibição. Um dos foguetes Saturn 5 não utilizados construídos para ir à Lua agora é uma atração turística no Johnson Space Center da NASA em Houston.

9.1 A SUPERFÍCIE LUNAR

COMPOSIÇÃO E ESTRUTURA DA LUA

A composição da Lua não é a mesma da Terra. Com uma densidade média de apenas 3,3 g/cm³, a Lua deve ser feita quase inteiramente de rocha de silicato. Comparado com a Terra, há muito pouco ferro e outros metais. É como se a Lua fosse composta dos mesmos silicatos do manto e da crosta da Terra, com os metais e os voláteis removidos seletivamente. Essas diferenças na composição entre a Terra e a Lua fornecem pistas importantes sobre a origem da Lua, um tópico que abordaremos em detalhes mais adiante. Estudos do interior da Lua realizados com sismógrafos levados à Lua como parte do programa Apollo confirmam a ausência de um grande núcleo metálico. A espaçonave gêmea GRAIL lançada em órbita lunar em 2011 forneceu um rastreamento ainda mais preciso da estrutura interior. Também sabemos pelo estudo de amostras lunares que a água e outros voláteis se esgotaram da crosta lunar. O que pode ter é alguma água quimicamente ligada nas rochas lunares.

Gelo de água foi detectado em crateras permanentemente sombreadas perto dos pólos lunares. Em 2009, a NASA colidiu com uma pequena espaçonave chamada Lunar Crater Observation and Sensing Satellite (LCROSS) na cratera Cabeus perto do pólo sul da Lua. O impacto a 9.000 quilômetros por hora liberou energia equivalente a 2 toneladas de dinamite. O impacto fez com uma nuvem de vapor de água e outros produtos químicos subisse acima da superfície.

A quantidade total de gelo de água nas crateras polares da Lua é estimada em centenas de bilhões de toneladas. Como líquido, isso seria apenas água suficiente para encher um lago de 160 quilômetros de diâmetro, mas comparado com o resto da crosta lunar seca, tanta água é notável. Presumivelmente, essa água polar foi transportada para a Lua por cometas e asteroides que atingiram sua superfície. Uma pequena fração da água congelou em algumas regiões extremamente frias (armadilhas frias) onde o Sol nunca brilha, como o fundo de crateras profundas nos pólos da Lua. Uma razão pela qual essa descoberta pode ser importante é que ela levanta a possibilidade de futura habitação humana perto dos pólos lunares, ou mesmo de uma base lunar como estação intermediária em rotas para Marte e o resto do sistema solar. Se o gelo pudesse ser extraído, produziria água e oxigênio para o suporte humano, e poderia ser decomposto em hidrogênio e oxigênio, um potente combustível de foguete.

APARENCIA GERAL DA LUA

Se você olhar para a Lua através de um telescópio, poderá ver que ela está coberta por crateras de impacto de todos os tamanhos. A mais notável das características da superfície da Lua – aquelas que podem ser vistas a olho nu e que compõem a característica frequentemente chamada de “o homem na Lua” – são vastas manchas de fluxos de lava mais escuros.

Séculos atrás, os primeiros observadores lunares pensavam que a Lua tinha continentes e oceanos e que era uma possível morada de vida. Eles chamavam as áreas escuras de “mares” (maria em latim, ou mare no singular, pronunciado “mah ray”). Seus nomes, Mare Nubium (Mar de Nuvens), Mare Tranquillitatis (Mar de Tranquilidade), e assim por diante, ainda estão em uso hoje. Em contraste, as áreas de “terra” entre os mares não são nomeadas. Milhares de crateras individuais foram nomeadas, no entanto, principalmente para grandes cientistas e filósofos (Fig. 9.4). Entre as crateras mais proeminentes estão aquelas nomeadas em homenagem a Platão, Copérnico, Tycho e Kepler. Galileu tem apenas uma pequena cratera, refletindo sua baixa posição entre os cientistas do Vaticano que fizeram alguns dos primeiros mapas lunares.

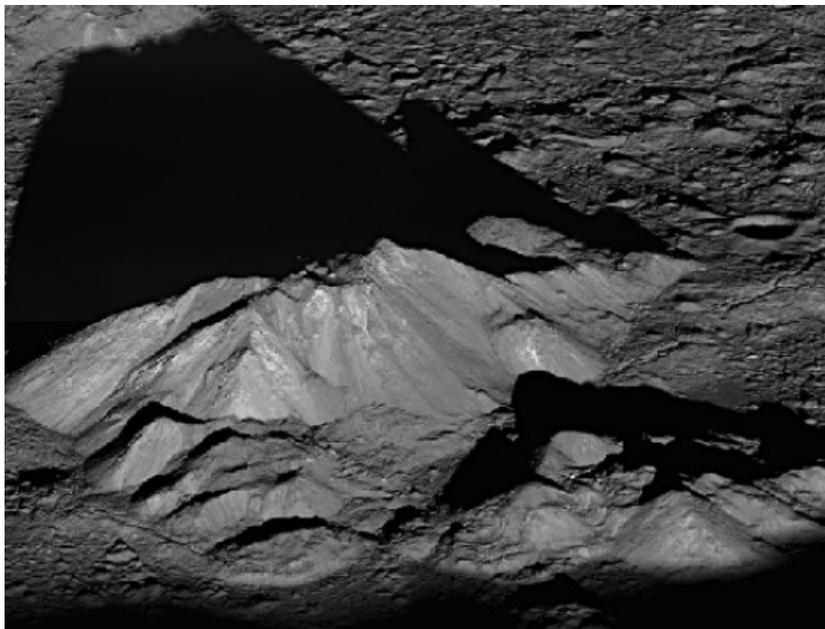


Figura 9.4: Nascer do sol nos picos das montanhas centrais da cratera Tycho, conforme imagem do Lunar Reconnaissance Orbiter da NASA. Tycho, com cerca de 82 quilômetros de diâmetro, é uma das mais jovens das grandes crateras lunares. A montanha central se eleva 12 quilômetros acima do fundo da cratera.

Sabemos hoje que a semelhança das características lunares com as terrestres é superficial. Mesmo quando parecem ligeiramente iguais, as origens, como crateras e montanhas, são muito diferentes de suas contrapartes terrestres. A relativa falta de atividade interna da Lua, juntamente com a ausência de ar e água, torna a maior parte de sua história geológica diferente de tudo que conhecemos na Terra.

HISTÓRIA LUNAR

Para traçar a história detalhada da Lua ou de qualquer planeta, devemos ser capazes de estimar as idades de rochas individuais. Uma vez que as amostras lunares foram trazidas pelos astronautas da Apollo, as técnicas de datação radioativa que haviam sido desenvolvidas para a Terra foram aplicadas a elas. As idades de solidificação das amostras variaram de cerca de 3,3 a 4,4 bilhões de anos, substancialmente mais velhas do que a maioria das rochas da Terra.



Figura 9.5: Planalto Lunar. As antigas terras altas lunares com muitas crateras compõem 83% da superfície da Lua.

A maior parte da crosta da Lua (83%) consiste em rochas de silicato chamadas anortositos; essas regiões são conhecidas como as terras altas lunares. Eles são feitos de rocha de densidade relativamente baixa que solidificou na Lua esfriando como escória flutuando no topo de uma fundição. Como eles se formaram tão cedo na história lunar (entre 4,1 e 4,4 bilhões de anos atrás), os planaltos também são extremamente cheios de crateras, carregando as cicatrizes de todos esses bilhões de anos de impactos por detritos interplanetários (Fig. 9.5).

Ao contrário das montanhas da Terra, as terras altas da Lua não têm dobras acentuadas em seus intervalos. As terras altas têm perfis baixos e arredondados que lembram as montanhas mais antigas e erodidas da Terra (Fig. 9.6). Como não há atmosfera ou água na Lua, não houve vento, água ou gelo para esculpi-los em penhascos e picos pontiagudos, da maneira como os vimos moldados na Terra. Suas características suaves são atribuídas à erosão gradual, principalmente devido à formação de crateras de impacto de meteoritos.



Figura 9.6: Montanha Lunar. Esta foto do Monte Hadley à beira do Mare Imbrium foi tirada por Dave Scott, um dos astronautas da Apollo 15. Observe os contornos suaves das montanhas lunares, que não foram esculpidas pela água ou pelo gelo.

As maria têm muito menos crateras do que as terras altas e cobrem apenas 17% da superfície lunar, principalmente no lado da Lua voltado para a Terra (Fig. 9.7).



Figura 9.7: Maria Lunar. Cerca de 17% da superfície da Lua consiste em maria – planícies planas de lava basáltica. Esta vista da Mare Imbrium também mostra numerosas crateras secundárias e evidências de material ejetado da grande cratera Copérnico no horizonte superior. Copérnico é uma cratera de impacto com quase 100 quilômetros de diâmetro que se formou muito tempo depois que a lava em Imbrium já havia sido depositada.

Hoje, sabemos que as maria consistem principalmente de basalto de cor escura (lava vulcânica) depositado em erupções vulcânicas há bilhões de anos. Eventualmente, esses fluxos de lava encheram parcialmente as enormes depressões chamadas bacias de impacto, que foram produzidas por colisões de grandes pedaços de material com a Lua relativamente cedo em sua história. O basalto na Lua (Fig. 9.8) é muito semelhante em composição à crosta sob os oceanos da Terra ou às lavas erupcionadas por muitos vulcões

terrestres. Na Lua as atividades vulcânicas cessaram há cerca de 3,3 bilhões de anos. Depois disso, o interior da Lua esfriou e a atividade vulcânica ficou limitada a poucas áreas pequenas. As forças primárias que alteram a superfície vêm de fora, não do interior.



Figura 9.8: Rocha de uma égua lunar. Nesta amostra de basalto da superfície do mar, você pode ver os buracos deixados por bolhas de gás, que são características de rochas formadas a partir de lava. Todas as rochas lunares são quimicamente distintas das rochas terrestres, fato que permitiu aos cientistas identificar algumas amostras lunares entre os milhares de meteoritos que chegam à Terra.

SOB A SUPERFÍCIE LUNAR

“The surface is fine and powdery. I can pick it up loosely with my toe. But I can see the footprints of my boots and the treads in the fine sandy particles.”—Neil Armstrong, astronauta da Apollo 11, imediatamente após pisar na Lua pela primeira vez.

A superfície da Lua está enterrada sob um solo de grão fino de minúsculos fragmentos de rocha pulverizada. A poeira basáltica escura da maria lunar foi levantada por cada passo dos astronautas e, assim, acabou entrando em todos os equipamentos dos astronautas. As camadas superiores da superfície são porosas, consistindo de poeira frouxamente compactada na qual suas botas afundaram vários centímetros (Fig. 9.9). Essa poeira lunar, como tantas outras na Lua, é produto de impactos. Cada evento de cratera, grande ou pequeno, quebra a rocha da superfície lunar e espalha os fragmentos. Em última análise, bilhões de anos de impactos reduziram grande parte da camada superficial à partículas do tamanho de poeira ou areia.



Figura 9.9: Pegada na poeira lunar. Foto da impressão da bota de um astronauta no solo lunar.

Na ausência de qualquer atmosfera, a superfície lunar experimenta extremos de temperatura muito maiores do que a superfície da Terra, embora a Terra esteja praticamente à mesma distância do Sol. Perto do meio-dia local, quando o Sol está mais alto no céu, a temperatura do solo lunar escuro sobe acima do ponto de ebulição da água. Durante a longa noite lunar (que, como o dia lunar, dura duas semanas terrestres), a temperatura cai para cerca de 100 K ($-173\text{ }^{\circ}\text{C}$). O resfriamento extremo é resultado não apenas da ausência de ar, mas também da natureza porosa do solo empoeirado da Lua, que esfria mais rapidamente do que a rocha sólida. Ver “[A evolução da Lua](#)”.

OBSERVANDO A LUA

A Lua é uma das vistas mais bonitas do céu, e é o único objeto próximo o suficiente para revelar sua topografia (características da superfície, como montanhas e vales). Um telescópio amador bastante pequeno mostra facilmente crateras e montanhas na Lua tão pequenas quanto alguns quilômetros de diâmetro.

A aparência da superfície da Lua muda drasticamente com sua fase. Na lua cheia, quase não mostra detalhes topográficos, e você deve olhar de perto para ver mais do que algumas crateras. Isso ocorre porque a luz do sol ilumina a superfície diretamente e, nessa

iluminação plana, nenhuma sombra é projetada. Muito mais reveladora é a vista perto do primeiro ou terceiro trimestre, quando a luz do sol entra pela lateral, fazendo com que as feições topográficas produzam sombras nítidas. É quase sempre mais gratificante estudar uma superfície planetária sob tal iluminação oblíqua, quando se pode obter o máximo de informações sobre o relevo da superfície.

A iluminação plana em fase cheia, no entanto, acentua os contrastes de brilho na Lua, como aqueles entre a maria e as terras altas. Observe na Fig. 9.10 que várias das grandes crateras mare parecem estar cercadas por material branco e que as faixas ou raios de luz que podem se estender por centenas de quilômetros pela superfície são claramente visíveis. Esses materiais mais leves são ejetados, lançados do impacto que forma a cratera.



Figura 9.10: Aparência da Lua em Diferentes Fases. (a) A iluminação de lado traz crateras e outras características topográficas em relevo nítido, como visto no lado esquerdo. (b) Na fase cheia, não há sombras, e é mais difícil ver tais feições. No entanto, a iluminação plana na fase cheia traz algumas características da superfície, como o brilho de material ejetado que se estendem de algumas grandes crateras jovens.

9.2 A ORIGEM DA LUA

É característico da ciência moderna perguntar como as coisas se originaram. No entanto, entender a origem da Lua provou ser um desafio para os cientistas planetários. Parte da dificuldade é simplesmente que sabemos muito sobre a Lua. Como veremos, um problema-chave é que a Lua é ao mesmo tempo tentadoramente semelhante à Terra e frustrantemente diferente.

IDEIAS PARA A ORIGEM DA LUA

A maioria das hipóteses para a origem da Lua seguiu uma das três ideias gerais:

1. A teoria da fissão — a Lua já foi parte da Terra, mas de alguma forma separou-se dela no início de sua história.
2. A teoria irmã — a Lua se formou junto (mas independente) da Terra.
3. A teoria da captura — a Lua se formou em outro lugar do sistema solar e foi capturada pela Terra.

Infelizmente, parece haver problemas fundamentais com cada uma dessas ideias. Talvez a hipótese mais fácil de rejeitar seja a teoria da captura. Sua principal desvantagem é que a Terra primitiva não poderia ter capturado uma lua tão grande de outro lugar. Um corpo que se aproxima de outro não pode entrar em órbita em torno dele sem uma perda substancial de energia; esta é a razão pela qual as naves espaciais destinadas a orbitar outros planetas são equipadas com retrofoguetes. Além disso, se tal captura ocorresse, o objeto capturado entraria em uma órbita muito excêntrica em vez da órbita quase circular que nossa Lua ocupa hoje. Finalmente, existem muitas semelhanças de composição entre a Terra e a Lua, particularmente uma fração idêntica dos principais isótopos de oxigênio, para justificar a busca de uma origem completamente independente.

A hipótese da fissão, que afirma que a Lua se separou da Terra, foi sugerida no final do século XIX. Ainda incandescente, a Terra teria começado a girar em torno de si mesma, com velocidade muito maior à que ocorre hoje, e assim pedaços ainda quentes foram jogados para longe. A teoria alega que a região do oceano Pacífico corresponde ao pedaço que formou a Lua. A ideia não é muito aceita porque o espaço oceânico não seria suficiente para compor um astro das dimensões da Lua e, se ela tivesse realmente se desprendido da Terra, sua órbita seria outra.

Teoria irmã propõe que a Lua se formou ao redor da Terra logo no início da formação do nosso sistema solar. Depois da formação da Terra, teria sobrado material — que ficou gravitando em volta dela e, com o tempo, acabou se aglomerando e formando a Lua. A justificativa para validar essa ideia é que o satélite e nosso planeta têm algumas características em comum, como a idade das rochas existentes em ambas as superfícies. Porém, há diferenças significativas que ficam sem explicação, como a menor quantidade de ferro encontrada em solo lunar.

Em um esforço para resolver essas aparentes contradições, os cientistas desenvolveram uma quarta hipótese para a origem da Lua, que envolve um impacto gigante no início da história da Terra (ver Fig. 9.11). Há evidências crescentes de que grandes corpos – objetos de massa essencialmente planetária – estavam orbitando o interior do sistema solar no momento em que os planetas terrestres se formaram. A hipótese do impacto gigante prevê a Terra sendo atingida obliquamente por um objeto com aproximadamente um décimo da massa da Terra – uma “bala” do tamanho de Marte. Este é quase o maior impacto que a Terra poderia experimentar sem ser destruída.

Tal impacto perturbaria grande parte da Terra e ejetaria uma grande quantidade de material no espaço, liberando energia quase suficiente para quebrar o planeta. Simulações computacionais indicam que o material totalizando vários por cento da massa da Terra poderia ser ejetado em tal impacto. A maior parte desse material seria dos mantos pedregosos da Terra e do corpo impactante, não de seus núcleos metálicos. Este vapor de rocha ejetado então esfriou e formou um anel de material orbitando a Terra. Foi este anel que finalmente formou a Lua.

Embora não tenhamos nenhuma maneira atual de mostrar que a hipótese do impacto gigante é o modelo correto da origem da Lua, ela oferece soluções potenciais para a maioria dos principais problemas levantados pela química da Lua. Primeiro, como a matéria-prima da Lua é derivada dos mantos da Terra e do projétil, a ausência de metais é facilmente compreendida. Em segundo lugar, a maioria dos elementos voláteis teriam sido perdidos durante a fase de alta temperatura após o impacto, explicando a falta desses materiais na Lua. No entanto, ao fazer a Lua principalmente de material do manto terrestre, também é possível entender semelhanças, como abundâncias idênticas de vários isótopos de oxigênio.

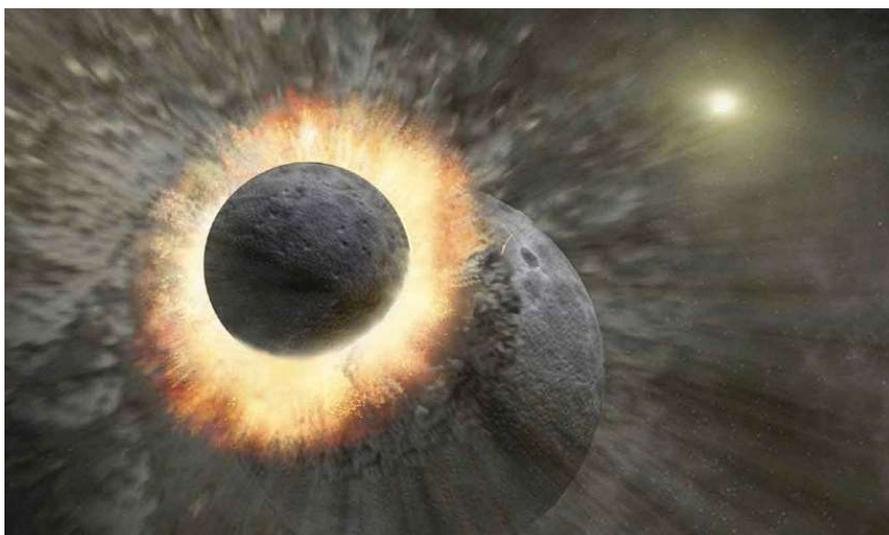


Figura 9.11: Possível origem da formação da Lua. Ver [Formação da Lua](#)

9.3 MERCÚRIO

O planeta Mercúrio é semelhante à Lua em muitos aspectos. Como a Lua, ela não tem atmosfera e sua superfície é repleta de crateras. Também compartilha com a Lua um possível nascimento violento.

ORBITA DE MERCÚRIO

Mercúrio é o planeta mais próximo do Sol e, de acordo com a terceira lei de Kepler, tem o menor período de revolução em torno do Sol (88 de nossos dias) e a maior velocidade orbital média (48 quilômetros por segundo). É apropriadamente nomeado como o deus mensageiro mais veloz dos romanos (Hermes para os romanos – o mensageiro mais veloz do olimpo). Como Mercúrio permanece próximo ao Sol, pode ser difícil identificá-lo no céu. Como você poderia esperar, é melhor visto quando sua órbita excêntrica o leva o mais longe possível do Sol.

O semieixo maior da órbita de Mercúrio – ou seja, a distância média do planeta ao Sol – é de 58 milhões de quilômetros, ou 0,39 UA. No entanto, como sua órbita tem a alta excentricidade de 0,206, a distância real de Mercúrio ao Sol varia de 46 milhões de quilômetros no periélio a 70 milhões de quilômetros no afélio.

COMPOSIÇÃO E ESTRUTURA

A massa de Mercúrio é um oitavo da massa da Terra, tornando-o o menor planeta terrestre. Mercúrio é o menor planeta (exceto os planetas anões), tendo um diâmetro de 4.878 quilômetros, menos da metade da Terra. A densidade de Mercúrio é de $5,4 \text{ g/cm}^3$, muito maior que a densidade da Lua, indicando que a composição desses dois objetos difere substancialmente.

A composição de Mercúrio é uma das coisas mais interessantes e o torna única entre os planetas. A alta densidade de Mercúrio nos diz que ele deve ser composto em grande parte por materiais mais pesados, como metais. Os modelos mais prováveis para o interior de Mercúrio sugerem um núcleo metálico de ferro-níquel, 60% da massa total, com o resto do planeta composto principalmente de silicatos. O núcleo tem um diâmetro de 3.500

quilômetros e se estende até 700 quilômetros da superfície. Poderíamos pensar em Mercúrio como uma bola de metal do tamanho da Lua cercada por uma crosta rochosa de 700 quilômetros de espessura (Figura 9.20). Ao contrário da Lua, Mercúrio tem um campo magnético fraco. A existência deste campo é consistente com a presença de um grande núcleo de metal e sugere que pelo menos parte do núcleo deve ser líquido para gerar o campo magnético observado

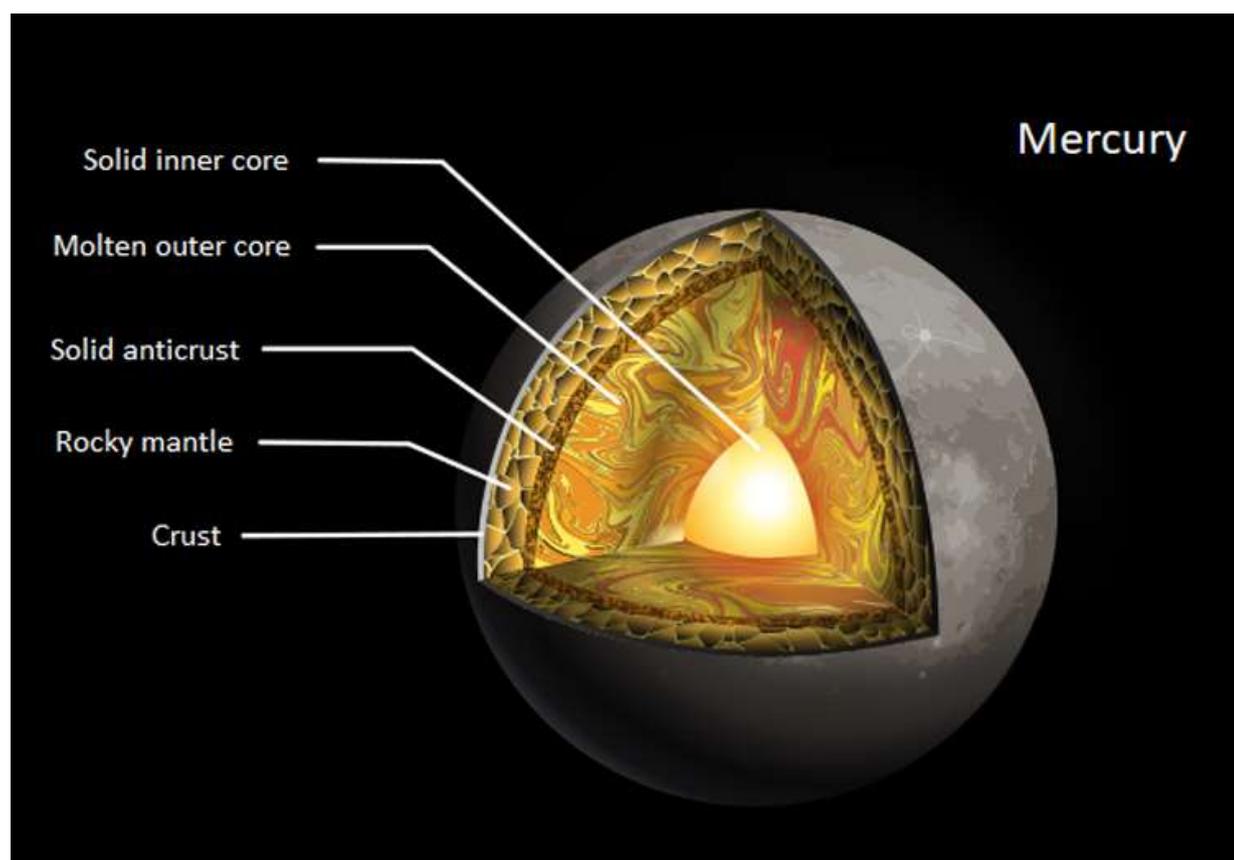


Figura 9.2: Estrutura Interna de Mercúrio. O interior de Mercúrio é dominado por um núcleo metálico do mesmo tamanho da nossa Lua.

As imagens da espaçonave, das quais a Fig. 9.3 é um exemplo, mostram uma superfície cheia de crateras com várias bacias de impacto de vários anéis e manchas brilhantes com raios de material ejetado perto de alguns dos pontos de impacto. As imagens também mostram algumas áreas mais suaves entre as crateras que se acredita terem resultado de fluxos de lava do interior. No entanto, Mercúrio não tem grandes planícies de lava ou maria como as que vemos na Lua. Tal como acontece com a Lua, a cor em Mercúrio é sutil e pouco visível.



Figura 9.3: Imagem colorida de Mercury capturada pelo Messenger.

Mercúrio não tem luas nem atmosfera, embora haja evidências de que está cercado por uma nuvem extremamente fina de material volátil que foi expelido das rochas da superfície pelo impacto de partículas de poeira interplanetária e bombardeio por prótons na superfície por vento solar. Esta exosfera consiste em elementos relativamente leves, como hidrogênio, hélio, oxigênio, sódio, potássio e cálcio. A pressão do vento solar afasta o material de Mercúrio para formar uma cauda que se estende na direção antissolar, como a cauda de um cometa. A cauda é muito fraca para ser vista a olho nu, mas foi registrada em imagens terrestres tiradas na luz amarela do sódio.

A inclinação axial de Mercúrio (o ângulo entre seu eixo de rotação e a perpendicular ao seu plano orbital) é de apenas 2 minutos de arco, o que é muito pequeno. Assim, não há estações em Mercúrio, quando um ou outro pólo está mais voltado para o Sol, como ocorre na Terra. A pequena inclinação axial significa que há regiões dentro de crateras próximas aos pólos que estão em escuridão permanente e, como não há atmosfera para transferir calor de outras partes da superfície, as temperaturas nas regiões sombreadas estão em torno de $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$. O lado diurno de Mercúrio pode atingir $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ que, apesar da proximidade de Mercúrio com o Sol, ainda não é tão quente quanto a superfície de Vênus (tipicamente $465\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Observações de radar detectaram depósitos de material altamente refletor, que se acredita ser gelo de água, no chão de algumas das crateras polares e esta descoberta foi posteriormente confirmada por dados da nave espacial Messenger. A água pode ter vindo de colisões de cometas com o planeta, ou de gases do interior de Mercúrio. Uma fração da água liberada por essas vias migraria para os polos e se condensaria nas regiões frias, onde permanece até hoje. Mercúrio gira três vezes em torno de seu eixo para cada duas órbitas ao redor do Sol. É o único planeta que exhibe essa relação entre seu giro entorno do seu próprio eixo e sua órbita, e há algumas consequências interessantes para observadores que um dia possam estar posicionados na superfície de Mercúrio.

Mercúrio gira uma vez entorno do seu eixo, a cada 59 dias terrestres e um ano seria de aproximadamente 88 dias.

Para tornar as coisas ainda mais interessantes, lembre-se de que Mercúrio tem uma órbita excêntrica, o que significa que sua distância do Sol varia significativamente durante cada ano mercuriano. Pela lei de Kepler, o planeta se move mais rápido em sua órbita quando está mais próximo do Sol. Vamos examinar como isso afeta a maneira pela qual veríamos o Sol no céu durante um ciclo de 176 dias terrestres. Veremos a situação como se estivéssemos na superfície de Mercúrio no centro de uma bacia gigante que os astrônomos chamam de Caloris (Fig. 9.4).

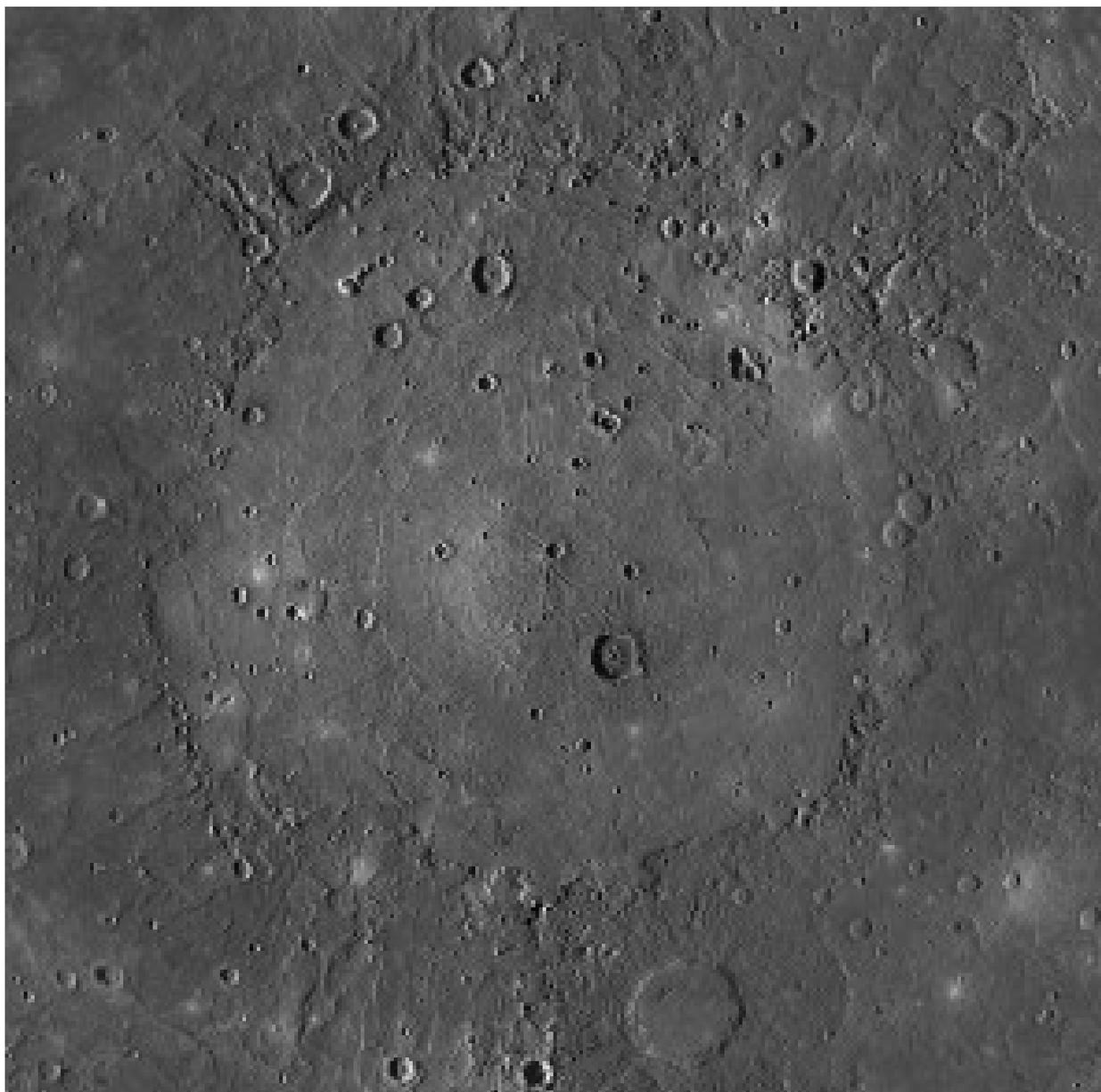


Figura 9.4: *Bacia Caloris* (do latim e significa *calor*), também chamada de **Caloris Planitia**, é uma extensa cratera de impacto na superfície de Mercúrio com aproximadamente 1.550 km de diâmetro, uma das maiores bacias de impacto do Sistema Solar. A cratera foi descoberta em 1974 e está cercada por um anel de montanhas de aproximadamente de 2 km de altura.

Não há evidências de placas tectônicas em Mercúrio. No entanto, as longas escarpas distintivas do planeta podem às vezes ser vistas cortando crateras; isso significa que as escarpas devem ter se formado depois das crateras (Fig. 9.5).



Figura 9.5: Escarpa Discovery em Mercúrio. Este longo penhasco, com quase 1 quilômetro de altura e mais de 100 quilômetros de comprimento, corta várias crateras.

A ORIGEM DE MERCURIO

O problema de entender como Mercúrio se formou é o inverso do problema colocado pela composição da Lua. Vimos que, ao contrário da Lua, Mercúrio é composto principalmente de metal. No entanto, os astrônomos pensam que Mercúrio deveria ter se formado com aproximadamente a mesma proporção de metal para silicato que a encontrada na Terra ou Vênus. Como ele perdeu tanto de seu material rochoso?

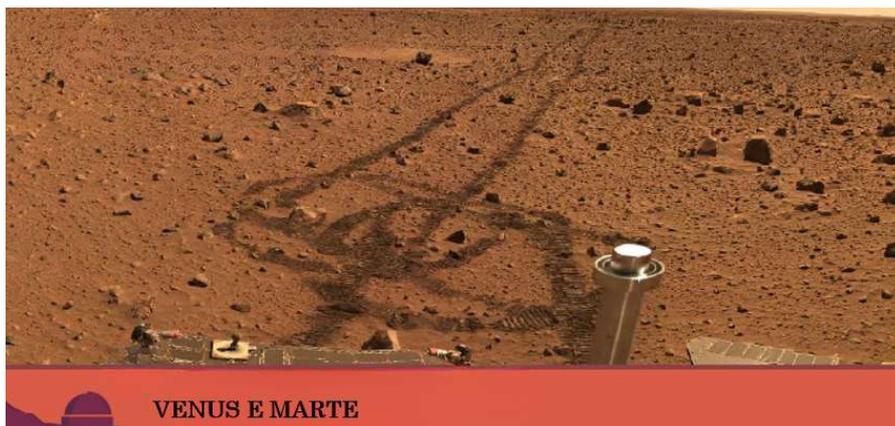
A explicação mais provável para a perda de silicato de Mercúrio pode ser semelhante à explicação para a falta de um núcleo metálico na Lua. É provável que Mercúrio tenha sofrido vários impactos gigantes muito cedo em sua juventude, e um ou mais deles podem ter arrancado uma fração de seu manto e crosta, deixando um corpo dominado por seu núcleo de ferro.



UMA INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA

Prof. Dr. Fernando R de Paula
Departamento de Física e Química

Ilha Solteira 2024



10 VENUS E MARTE

A Lua e Mercúrio estão geologicamente mortos. Em contraste, os planetas terrestres maiores – Terra, Vênus e Marte – são mundos mais ativos e interessantes. Já discutimos a Terra e agora nós voltamos para Vênus e Marte. Estes são os planetas mais próximos e os mais acessíveis às naves espaciais. Não surpreendentemente, o maior esforço na exploração planetária foi dedicado a esses mundos fascinantes. Marte é excepcionalmente interessante, com evidências que apontam para condições habitáveis no passado. Ainda hoje, estamos descobrindo coisas sobre Marte que o tornam o lugar mais provável onde os humanos podem estabelecer um habitat no futuro. No entanto, nossos exploradores robôs mostraram claramente que nem Vênus nem Marte têm condições semelhantes às da Terra. Como aconteceu que esses três planetas terrestres vizinhos divergiram tão dramaticamente em sua evolução?

10.1 OS PLANETAS MAIS PRÓXIMOS: UMA VISÃO GERAL

Como você pode esperar de vizinhos próximos, Marte e Vênus estão entre os objetos mais brilhantes do céu noturno.

A distância média de Marte ao Sol é de 227 milhões de quilômetros (1,52 UA). A órbita de Vênus é quase circular, a uma distância de 108 milhões de quilômetros (0,72 UA) do Sol. Como Mercúrio, Vênus às vezes aparece como uma “estrela da noite” e às vezes como uma “estrela da manhã”. Vênus se aproxima mais da Terra do que qualquer outro planeta: no ponto mais próximo, fica a apenas 40 milhões de quilômetros de nós. O mais próximo que Marte já chegou da Terra é de cerca de 56 milhões de quilômetros.

Vênus parece muito brilhante, e até mesmo um pequeno telescópio revela que passa por fases como a Lua. Galileu descobriu que Vênus exibe uma gama completa de fases, e ele usou isso como um argumento para mostrar que Vênus deve circundar o Sol e não a Terra. A superfície real do planeta não é visível porque está envolta por nuvens densas que refletem cerca de 70% da luz solar que incide sobre eles, frustrando os esforços para estudar a superfície subjacente, mesmo com câmeras em órbita ao redor do planeta (Fig. 10.1).



Figura 10.1: Vênus fotografado pela Pioneer Venus Orbiter. Esta imagem ultravioleta mostra uma estrutura de nuvens na atmosfera superior que seria invisível em comprimentos de onda visíveis. Observe que não há sequer um vislumbre da superfície do planeta.

Em contraste, Marte é mais tentador visto através de um telescópio (Fig. 10.2). O planeta é distintamente vermelho, devido (como sabemos agora) à presença de óxidos de ferro em seu solo. Essa cor pode explicar sua associação com a guerra (e sangue) nas lendas das primeiras culturas. A melhor resolução obtida por telescópios no solo é de cerca de 100 quilômetros, ou aproximadamente a mesma que podemos ver na Lua a olho nu. Nesta resolução, nenhum indício de estrutura topográfica pode ser detectado: nenhuma montanha, nenhum vale, nem mesmo crateras de impacto. Por outro lado, as calotas polares brilhantes podem ser vistas facilmente, juntamente com marcas escuras na superfície que às vezes mudam de contorno e intensidade de estação para estação.

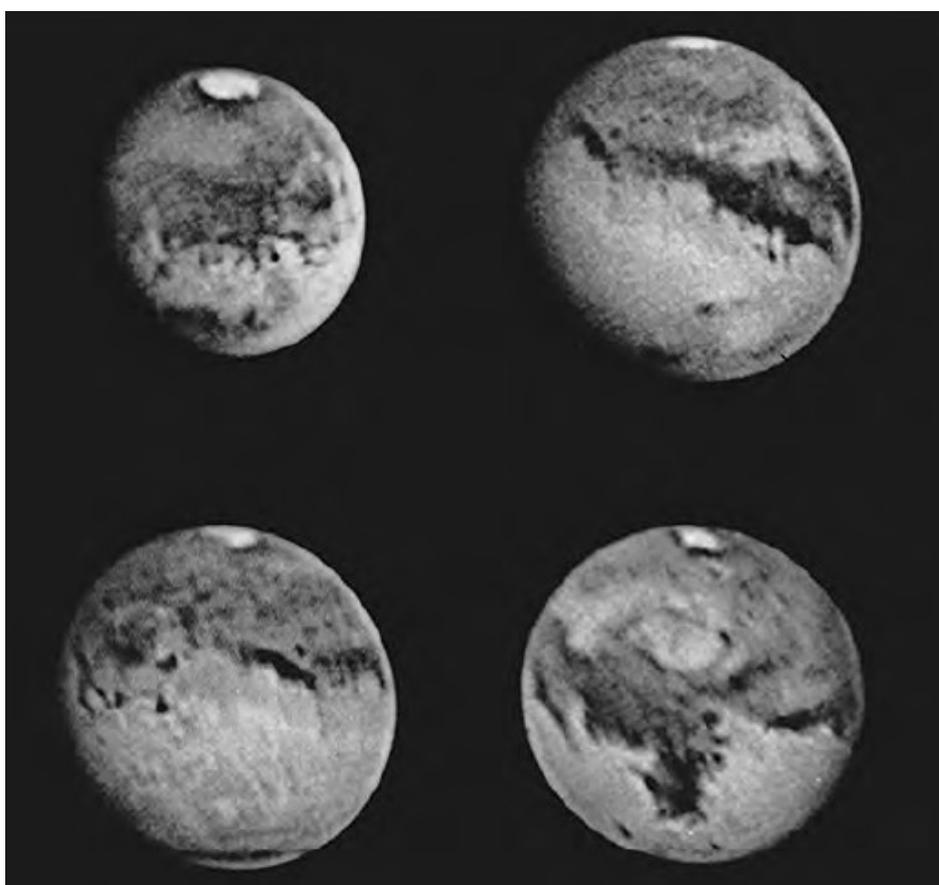


Figura 10.2: Marte visto da superfície da Terra. Estas estão entre as melhores fotos de Marte baseadas na Terra, tiradas em 1988, quando o planeta estava excepcionalmente perto da Terra. As calotas polares e as marcas escuras da superfície são evidentes.

Por algumas décadas, até virada do século XX, alguns astrônomos acreditaram ter visto evidências de uma civilização inteligente em Marte. A controvérsia começou em 1877, quando o astrônomo italiano Giovanni Schiaparelli (1835-1910) anunciou que podia ver linhas longas, fracas e retas em Marte que ele chamou de canale. Nos países de língua

inglesa, o termo foi traduzido erroneamente como “canais”, implicando uma origem artificial.

Mesmo antes das observações de Schiaparelli, os astrônomos observaram as calotas polares brilhantes mudarem de tamanho com as estações e observaram variações nas características escuras da superfície. Com um pouco de imaginação, não era difícil imaginar os canais como longos campos de plantações à beira de valas de irrigação que traziam água do derretimento do gelo polar para os desertos remendados do planeta vermelho. (Eles assumiram que as calotas polares eram compostas de gelo de água, o que não é exatamente verdade, como veremos em breve.)

Até a morte em 1916, o proponente mais eficaz da vida inteligente em Marte era Percival Lowell, um astrônomo americano autodidata e membro da rica família Lowell de Boston (veja Fig. 10.3).



Figura 10.3: Percival Lowell (1855-1916). Esta fotografia de 1914 mostra Percival Lowell observando Vênus com seu telescópio de 24 polegadas em Flagstaff, Arizona.

ROTAÇÃO DOS PLANETAS

Os astrônomos determinaram o período de rotação de Marte com grande precisão observando o movimento das marcas permanentes da superfície; seu dia sideral é de 24 horas 37 minutos e 23 segundos, um pouco mais longo que o período de rotação da Terra. Essa alta precisão não é obtida observando Marte por uma única rotação, mas observando quantas voltas ele faz durante um longo período de tempo. Boas observações de Marte datam de mais de 200 anos.

O eixo de rotação de Marte tem uma inclinação de cerca de 25°, semelhante à inclinação do eixo da Terra. Assim, Marte experimenta estações muito parecidas com as da Terra. Por causa do ano marciano mais longo (quase dois anos terrestres), no entanto, cada estação dura cerca de seis de nossos meses.

A situação com Vênus é diferente, como nenhum detalhe da superfície pode ser visto através das nuvens de Vênus, seu período de rotação pode ser encontrado apenas refletindo sinais de radar. As primeiras observações de radar da rotação de Vênus foram feitas no início dos anos 1960. O período de rotação de Vênus é de 243 dias. Ainda mais surpreendente do que o tempo que Vênus leva para dar uma volta completa (um dia venusiano) é o fato de girar em uma direção para trás ou retrógrada (leste para oeste).

O planeta leva 225 dias terrestres para orbitar o Sol e 243 dias terrestres para girar em seu eixo. Portanto, o dia em Vênus é mais longo que o ano. Como resultado, o tempo que o Sol leva para retornar ao mesmo lugar no céu de Vênus – outra maneira de definir o significado de um dia – acaba sendo 117 dias terrestres. Embora não saibamos o motivo da lenta rotação retrógrada de Vênus, podemos supor que ele pode ter sofrido uma ou mais colisões durante o processo de formação do sistema solar.

PROPRIEDADES BÁSICAS DE VENUS E MARTE

Antes de discutir cada planeta individualmente, vamos comparar algumas de suas propriedades básicas entre si e com a Terra (Tab. 10.1). Vênus é, em muitos aspectos, gêmeo da Terra, com uma massa 0,82 vezes a massa da Terra e uma densidade quase idêntica. A quantidade média de atividade geológica também foi relativamente alta, quase tão alta quanto na Terra. Por outro lado, com uma pressão superficial quase 100 vezes maior que a nossa, a atmosfera de Vênus não é nada parecida com a da Terra. A superfície de Vênus também é notavelmente quente, com uma temperatura de 730 K

(aproximadamente 455 °C). Um dos principais desafios apresentados por Vênus é entender por que a atmosfera e o ambiente da superfície desse gêmeo divergiram tão acentuadamente dos da Terra.

Marte, por outro lado, é bastante pequeno, com uma massa de apenas 0,11 vezes a massa da Terra. No entanto, é maior do que a Lua ou Mercúrio e, ao contrário deles, retém uma atmosfera fina. Marte também é grande o suficiente para ter sustentado uma atividade geológica considerável no passado distante. Mas a coisa mais fascinante sobre Marte é que há muito tempo ele provavelmente tinha uma atmosfera espessa e mares de água líquida – as condições que associamos ao desenvolvimento da vida. Existe até uma chance de que alguma forma de vida persista hoje em ambientes protegidos.

Tabela 10.1: Propriedades da Terra, Venus e Marte

Propriedades	Terra	Venus	Marte
Semieixo maior (UA)	1,00	0,72	1,52
Período (anos)	1,00	0,61	1,88
Massa (Terra = 1)	1,00	0,82	0,11
Diâmetro (km)	12.756	12.102	6.790
Densidade (g/cm ³)	5,50	5,30	3,90
Gravidade na Superfície (Terra = 1)	1,00	0,91	0,38
Velocidade de escape (km/s)	11,20	10,4	5,00
Período de rotação (horas ou dias)	23,9 h	243 d	24,6 h
Área Superficial (Terra = 1)	1,00	0,90	0,28
Pressão atmosférica (bar)	1,00	90,00	0,007

10.2 O GEOLOGIA DE VENUS

Como Vênus tem aproximadamente o mesmo tamanho e composição que a Terra, podemos esperar que sua geologia seja semelhante. Isso é parcialmente verdade, mas Vênus não exibe o mesmo tipo de placas tectônicas que a Terra, e veremos que sua falta de erosão resulta em uma aparência de superfície muito diferente.

EXPLORAÇÃO DE NAVES ESPACIAIS DE VÊNUS

Quase 50 naves espaciais foram lançadas com destino a Vênus, mas apenas cerca de metade foram bem-sucedidas. Embora o sobrevoo US Mariner 2 de 1962 tenha sido o primeiro, a União Soviética lançou a maioria das missões subsequentes a Vênus. Em 1970, a Venera 7 tornou-se a primeira sonda a pousar e transmitir dados da superfície de Vênus. Operou por 23 minutos antes de sucumbir à alta temperatura da superfície. Sondagens seguiram ao longo de décadas, fotografando a superfície e analisando a atmosfera e o solo. Para entender a geologia de Vênus, no entanto, precisávamos fazer um estudo global de sua superfície, tarefa muito dificultada pelas perpétuas camadas de nuvens que cercam o planeta. A solução para observações é uso de radar para sondar a superfície obscurecida pela atmosfera.

O primeiro mapa de radar global foi feito pela sonda norte-americana Pioneer Venus no final da década de 1970, seguido por mapas melhores das sondas de radar gêmeas soviéticas Venera 15 e 16 no início da década de 1980. No entanto, a maioria de nossas informações sobre a geologia de Vênus é derivada da espaçonave americana Magellan, que mapeou Vênus com um poderoso radar de imagem. A Magellan produziu imagens com uma resolução de 100 metros, muito melhor do que a das missões anteriores, proporcionando nossa primeira visão detalhada da superfície do nosso planeta irmão (Fig. 10.4).

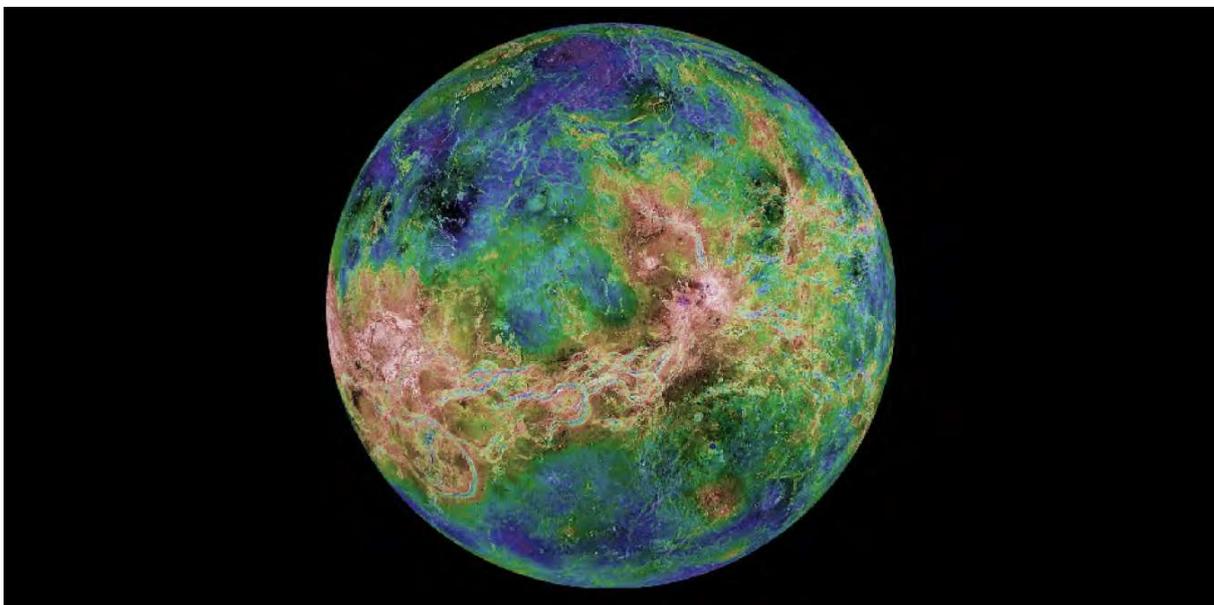


Figura 10.4: Mapa Radar de Vênus. Esta imagem composta tem uma resolução de cerca de 3 quilômetros. Cores foram adicionadas para indicar elevação, com azul significando baixo e marrom e branco alto. O grande continente Afrodite se estende ao redor do equador, onde a superfície brilhante (portanto áspera) foi deformada por forças tectônicas na crosta de Vênus.

SONDANDO ATRAVÉS DAS NÚVENS DE VÊNUS

Os mapas de radar de Vênus revelam um planeta que se parece muito com a aparência da Terra se a superfície do nosso planeta não estivesse sendo constantemente alterada pela erosão e deposição de sedimentos. Como não há água ou gelo em Vênus e as velocidades do vento na superfície são baixas, quase nada obscurece ou apaga as complexas características geológicas produzidas pelos movimentos da crosta de Vênus, por erupções vulcânicas e por crateras de impacto. Tendo finalmente penetrado abaixo das nuvens de Vênus, encontramos sua superfície nua, revelando a história de centenas de milhões de anos de atividade geológica.

Cerca de 75% da superfície de Vênus consiste em planícies de lava. Superficialmente, essas planícies se assemelham às bacias oceânicas basálticas da Terra, mas não foram produzidas da mesma maneira. Não há evidências de zonas de subducção em Vênus, indicando que, ao contrário da Terra, este planeta nunca experimentou placas tectônicas. Embora a convecção (a ascensão de materiais quentes) em seu manto tenha gerado grandes tensões na crosta de Vênus, elas não iniciaram o movimento de grandes placas continentais. A formação das planícies de lava de Vênus se assemelha mais à da maria lunar. Ambos foram o resultado de erupções de lava generalizadas sem o espalhamento crustal associado às placas tectônicas.

Erguendo-se acima das planícies de lava das planícies estão dois continentes. O maior continente de Vênus, chamado Afrodite, tem aproximadamente o tamanho da África (você pode vê-lo se destacar na Fig. 10.5). Afrodite se estende ao longo do equador por cerca de um terço do caminho ao redor do planeta. A próxima em tamanho é a região montanhosa do norte de Ishtar, que é do tamanho da Austrália. Ishtar contém a região mais alta do planeta, as Montanhas Maxwell, que se elevam 11 quilômetros acima das planícies circundantes. (As Montanhas Maxwell são a única característica em Vênus com o nome de um homem. Elas comemoram James Clerk Maxwell, cuja teoria do eletromagnetismo levou à invenção do radar. Todas as outras características são nomeadas para mulheres, seja da história ou da mitologia.)

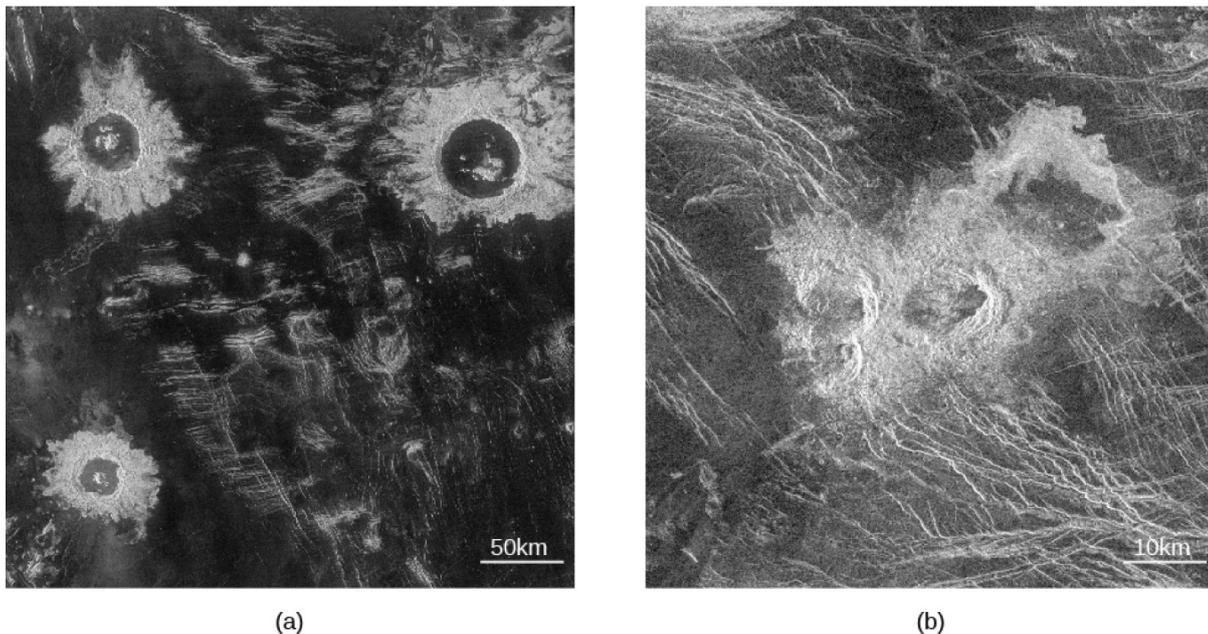


Figura 10.5: Crateras de Impacto em Vênus. (a) Essas grandes crateras de impacto estão na região Lavinia de Vênus. Por serem ásperas, as bordas da cratera e o material ejetado aparecem mais brilhantes nessas imagens de radar do que as planícies de lava circundantes mais suaves. A maior dessas crateras tem um diâmetro de 50 quilômetros. (b) Esta pequena e complexa cratera recebeu o nome da escritora Gertrude Stein. O impacto triplo foi causado pela separação do asteroide durante sua passagem pela espessa atmosfera de Vênus. O projétil tinha um diâmetro inicial entre 1 e 2 quilômetros.

Você pode pensar que a espessa atmosfera de Vênus protegeria a superfície dos impactos, queimando os projéteis muito antes que eles pudessem atingir a superfície. Mas este é o caso apenas de projéteis menores. Estatísticas de crateras mostram muito poucas crateras com menos de 10 quilômetros de diâmetro, indicando que projéteis menores que cerca de 1 quilômetro (o tamanho que normalmente produz uma cratera de 10 quilômetros) foram parados pela atmosfera. Essas crateras com diâmetros de 10 a 30 quilômetros são frequentemente distorcidas ou múltiplas, aparentemente porque o projétil que entra se partiu na atmosfera antes de atingir o solo, como mostrado na cratera Stein na Fig. 10.5. Se nos limitarmos a impactos que produzem crateras com diâmetros de 30 quilômetros ou maiores, no entanto, as contagens de crateras são tão úteis em Vênus para medir a idade da superfície quanto em corpos sem atmosfera, como a Lua.

As grandes crateras nas planícies venusianas indicam uma idade média da superfície entre 300 e 600 milhões de anos. Esses resultados indicam que Vênus é de fato um planeta com atividade geológica persistente, intermediária entre a das bacias oceânicas da Terra (que são mais jovens e mais ativas) e a de seus continentes (que são mais antigos e menos ativos).

Quase todas as grandes crateras em Vênus parecem recentes (sem modificações pela ação do tempo), com pouca degradação ou preenchimento por lava ou poeira levada pelo vento. Esta é uma forma de sabermos que as taxas de erosão ou deposição de sedimentos são muito baixas no planeta. Temos a impressão de que pouco aconteceu desde de que as planícies venusianas ressurgiram pela última vez por atividade vulcânica em grande escala. Aparentemente Vênus experimentou algum tipo de convulsão vulcânica em todo o planeta entre 300 e 600 milhões de anos atrás, um evento misterioso que é diferente de tudo na história terrestre.

VULCÕES EM VENUS

Como a Terra, Vênus é um planeta que experimentou vulcanismo generalizado. Nas planícies baixas, as erupções vulcânicas são a principal forma de renovação da superfície, com grandes fluxos de lava altamente fluida destruindo crateras antigas e gerando novas superfícies. Além disso, numerosas montanhas vulcânicas mais jovens e outras estruturas estão associadas a pontos quentes da superfície – lugares onde a convecção no manto do planeta transporta o calor interior para a superfície.

O maior vulcão de Vênus, chamado Sif Mons, tem cerca de 500 quilômetros de diâmetro e 3 quilômetros de altura – mais largo, mas mais baixo que o vulcão havaiano Mauna Loa. Em seu topo há uma cratera vulcânica, ou caldeira, com cerca de 40 quilômetros de diâmetro, e suas encostas mostram fluxos de lava de até 500 quilômetros de comprimento. Milhares de vulcões menores pontilham a superfície, até o limite de visibilidade das imagens de Magalhães, que correspondem a cones ou cúpulas do tamanho de um estacionamento de shopping. A maioria deles parece semelhante a vulcões terrestres. Outros vulcões têm formas incomuns, como as “cúpulas de panqueca” ilustradas na Fig. 10.6.

Todo o vulcanismo é resultado da erupção de lava na superfície do planeta. Mas a lava quente que sobe do interior de um planeta nem sempre chega à superfície. Tanto na Terra quanto em Vênus, essa lava ascendente pode se acumular para produzir protuberâncias na crosta. Muitas das cadeias de montanhas de granito na Terra, como a Sierra Nevada na Califórnia, envolvem esse vulcanismo subterrâneo. Essas protuberâncias são comuns em Vênus, onde produzem grandes feições circulares ou ovais chamadas coronae (singular: corona) (Fig. 10.7).

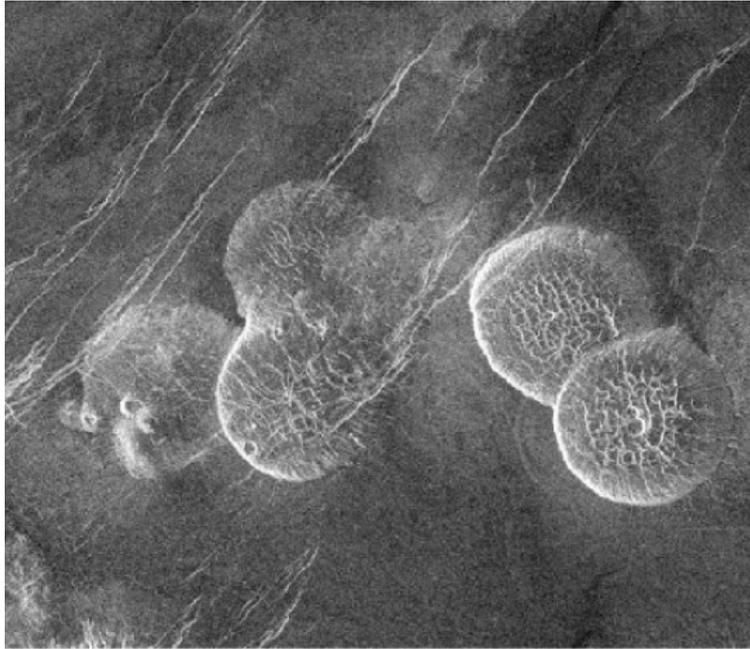


Figura 10.8: Vulcões em forma de panqueca em Vênus. Essas notáveis cúpulas circulares, cada uma com cerca de 25 quilômetros de diâmetro e cerca de 2 quilômetros de altura, são o resultado de erupções de lava altamente viscosa que se espalha uniformemente em todas as direções.

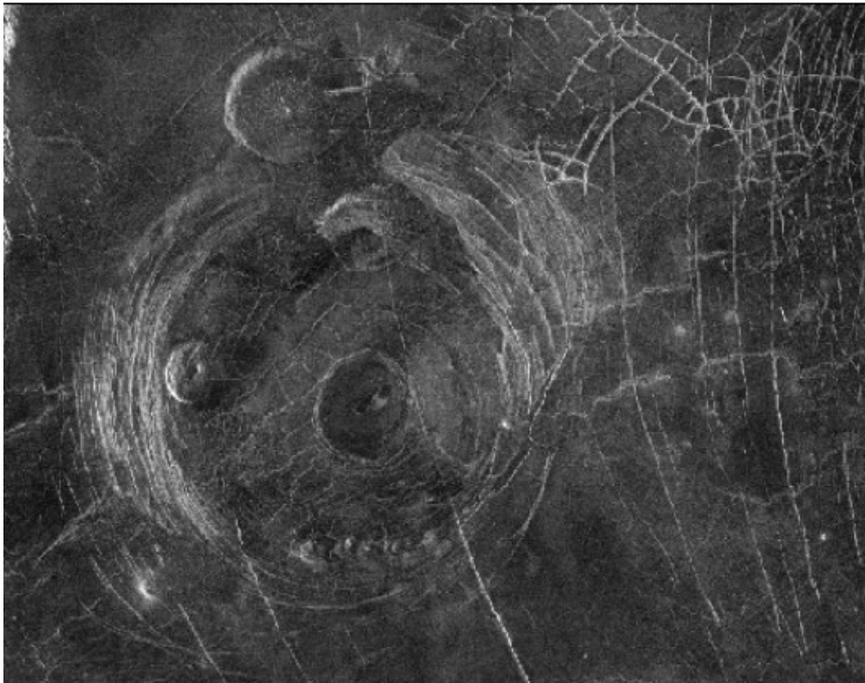


Figura 10.7: A coroa “Miss Piggy”. Fotla Corona está localizada nas planícies ao sul de Afrodite Terra. Padrões de fratura curvados mostram onde o material abaixo colocou tensão na superfície. Uma série de vulcões de panqueca e cúpula também são visíveis. Fotla era uma deusa celta da fertilidade. Alguns alunos veem uma semelhança entre essa coroa e a Miss Piggy dos Muppets (sua orelha esquerda, na parte superior da imagem, é o vulcão de panquecas no centro superior da imagem).

SOBRE A SUPERFÍCIE DE VÊNUS

A bem sucedida sonda Venera que aterrissou em Vênus na década de 1970 encontrou um planeta inóspito, com uma pressão atmosférica de superfície de 90 bar e uma temperatura quente o suficiente para derreter chumbo e zinco. Apesar dessas condições, a espaçonave conseguiu fotografar seus arredores e coletar amostras de superfície para análise química antes que seus instrumentos sucumbisse às diversidades da superfície do planeta. A luz do sol difusa que atingia a superfície era tingida de vermelho pelas nuvens, e o nível de iluminação era equivalente a um dia nublado na Terra.

As sondas descobriram que a rocha nas áreas de pouso é ígnea, principalmente basaltos. Exemplos das fotografias Venera são mostrados na Fig. 10.8. Cada imagem mostra uma paisagem plana e desolada com uma variedade de rochas, algumas das quais podem ter sido ejetadas por impactos. Outras áreas mostram fluxos de lava planos e em camadas. Não houve mais pousos em Vênus desde a década de 1970.

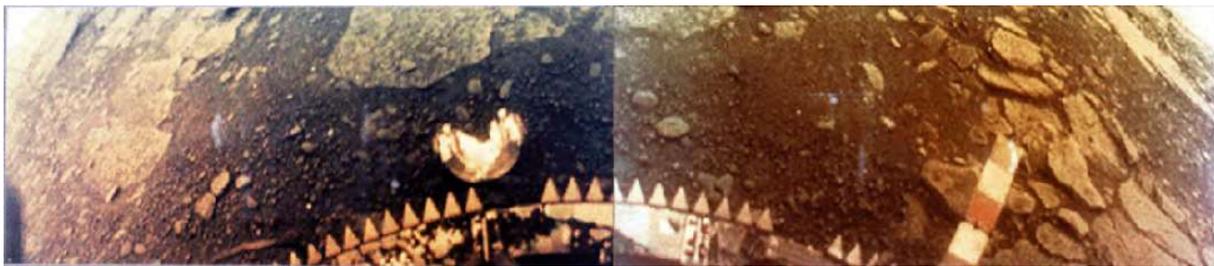


Figura 10.8: Superfície de Vênus. Essas imagens da superfície de Vênus são da espaçonave Venera 13. Tudo é laranja porque a espessa atmosfera de Vênus absorve as cores mais azuis da luz. O horizonte é visível no canto superior de cada imagem.

10.3 A MASSIVA ATMOSFERA DE VÊNUS

A espessa atmosfera de Vênus produz a alta temperatura da superfície e envolve a superfície em um perpétuo crepúsculo vermelho. A luz do sol não penetra diretamente através das nuvens pesadas, mas a superfície é bem iluminada por luz difusa (aproximadamente a mesma que a luz na Terra sob um céu nublado). O clima no fundo desta atmosfera profunda permanece perpetuamente quente e seco, com ventos calmos. Por causa do pesado manto de nuvens e atmosfera, um ponto na superfície de Vênus é semelhante a qualquer outro no que diz respeito ao clima.

COMPOSIÇÃO E ESTRUTURA DA ATMOSFERA

O gás mais abundante em Vênus é o dióxido de carbono (CO_2), que representa 96% da atmosfera. O segundo gás mais comum é o nitrogênio. A predominância do dióxido de carbono sobre o nitrogênio não é surpreendente quando você lembra que a atmosfera da Terra também seria principalmente dióxido de carbono se esse gás não estivesse preso em sedimentos marinhos.

A Tab. 10.2 compara as composições das atmosferas de Vênus, Marte e Terra. Expressas desta forma, como porcentagens, as proporções dos principais gases são muito semelhantes para Vênus e Marte, mas em quantidade total, suas atmosferas são dramaticamente diferentes. Com sua pressão superficial de 90 bars, a atmosfera venusiana é mais de 10.000 vezes mais massiva do que sua contraparte marciana. No geral, a atmosfera de Vênus é muito seca; a ausência de água é uma das maneiras importantes que Vênus difere da Terra.

Tabela 10.2: Composição atmosfera da Terra, Vênus e Marte.

Gás	Terra	Venus	Marte
CO_2	0,03 %	96 %	95,3 %
N_2	78,1 %	3,5 %	2,7 %
Ar	0,93 %	0,006 %	1,6 %
O_2	21,0 %	0,003 %	0,15 %
Ne	0,002 %	0,001 %	0,0003 %

A atmosfera de Vênus tem uma enorme troposfera (região de convecção) que se estende até pelo menos 50 quilômetros acima da superfície (Fig. 10.9). Dentro da troposfera, o gás é aquecido por baixo e circula lentamente, subindo perto do equador e descendo sobre os pólos. Estar na base da atmosfera de Vênus é algo como estar um quilômetro ou mais abaixo da superfície do oceano na Terra. Lá, a massa de água equilibra as variações de temperatura e resulta em um ambiente uniforme – o mesmo efeito que a espessa atmosfera tem em Vênus.

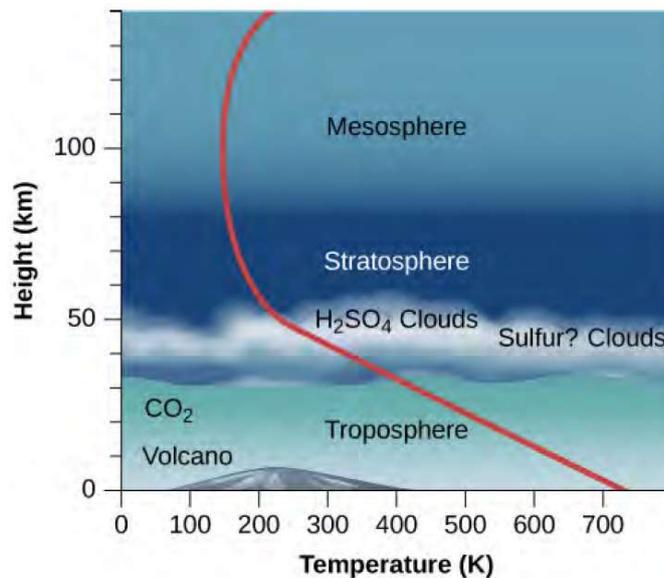


Figura 10.9: Atmosfera de Vênus. As camadas da atmosfera massiva de Vênus mostradas aqui são baseadas em dados das sondas de entrada Pioneer e Venera. A altura é medida ao longo do eixo esquerdo, a escala inferior mostra a temperatura e a linha vermelha permite que você leia a temperatura em cada altura. Observe como a temperatura sobe abruptamente abaixo das nuvens, graças ao enorme efeito estufa do planeta.

Na troposfera superior, entre 30 e 60 quilômetros acima da superfície, uma espessa camada de nuvens é composta principalmente por gotículas de ácido sulfúrico. O ácido sulfúrico (H_2SO_4) é formado a partir da combinação química de dióxido de enxofre (SO_2) e água (H_2O). Na atmosfera da Terra, o dióxido de enxofre é um dos principais gases emitidos pelos vulcões, mas é rapidamente diluído e lavado pela chuva. Na atmosfera seca de Vênus, essa substância desagradável é aparentemente estável. Abaixo de 30 quilômetros, a atmosfera de Vênus está livre de nuvens.

TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DE VÊNUS

A alta temperatura da superfície de Vênus foi descoberta por radioastrônomos no final da década de 1950 e confirmada pelas sondas Mariner e Venera. Como nosso planeta vizinho pode ser tão quente? Embora Vênus esteja um pouco mais próximo do Sol do que a Terra, sua superfície é centenas de graus mais quente do que você esperaria da luz solar extra que recebe. Os cientistas se perguntaram o que poderia estar aquecendo a superfície de Vênus a uma temperatura acima de 700 K. A resposta acabou sendo o efeito estufa.

O efeito estufa funciona em Vênus exatamente como na Terra, mas como Vênus tem muito mais CO_2 – quase um milhão de vezes mais – o efeito é muito mais forte. O CO_2 espesso

atua como um cobertor, tornando muito difícil para a radiação infravermelha (calor) do solo voltar ao espaço. Como resultado, a superfície aquece. O equilíbrio energético só é restabelecido quando o planeta está irradiando tanta energia quanto recebe do Sol, mas isso só pode acontecer quando a temperatura da baixa atmosfera é muito alta. Uma maneira de pensar em aquecimento de estufa é que ele deve aumentar a temperatura da superfície de Vênus até que esse equilíbrio de energia seja alcançado.

Vênus sempre teve uma atmosfera tão massiva e alta temperatura de superfície, ou pode ter evoluído para tais condições a partir de um clima que mais uma vez foi quase terrestre? A resposta a esta pergunta é de particular interesse para nós quando observamos os níveis crescentes de CO₂ na atmosfera da Terra. À medida que o efeito estufa se torna maior na Terra, corremos o risco de transformar nosso próprio planeta em um lugar infernal como Vênus?

Vamos tentar reconstruir a possível evolução de Vênus desde um início semelhante à Terra até seu estado atual. Vênus pode ter tido um clima semelhante ao da Terra, com temperaturas moderadas, oceanos de água e grande parte de seu CO₂ dissolvido no oceano ou combinado quimicamente com as rochas da superfície. Então permitimos um aquecimento adicional modesto – pelo aumento gradual na produção de energia do Sol, por exemplo. Quando calculamos como a atmosfera de Vênus responderia a esses efeitos, descobrimos que mesmo uma pequena quantidade de calor extra pode levar ao aumento da evaporação da água dos oceanos e à liberação de gás das rochas da superfície.

Isso, por sua vez, significa um aumento adicional no CO₂ e H₂O atmosféricos, gases que amplificariam o efeito estufa na atmosfera de Vênus. Isso levaria a ainda mais calor perto da superfície de Vênus e a liberação de mais CO₂ e H₂O. A menos que algum outro processo intervenha, a temperatura continua a subir. Tal situação é chamada de efeito estufa descontrolado *“runaway greenhouse effect”*.

Queremos enfatizar que o efeito estufa é um processo evolutivo. A atmosfera evolui de um pequeno efeito estufa, como na Terra, para uma situação como vemos hoje em Vênus.

Reverter a situação é difícil por causa do papel que a água desempenha. Na Terra, a maior parte do CO₂ está quimicamente ligado às rochas de nossa crosta ou dissolvido pela água em nossos oceanos. À medida que Vênus ficava cada vez mais quente, seus oceanos evaporavam, eliminando aquela válvula de segurança. Mas o vapor de água na atmosfera do planeta não durará para sempre na presença da luz ultravioleta do Sol. O elemento leve hidrogênio pode escapar da atmosfera, deixando o oxigênio para trás para se combinar quimicamente com a superfície da rocha. A perda de água é, portanto, um processo

irreversível: uma vez que a água se foi, ela não pode ser recuperada. Há evidências de que isso é exatamente o que aconteceu com a água em Vênus.

Não sabemos se o mesmo efeito estufa descontrolado poderia um dia acontecer na Terra. Embora não tenhamos certeza sobre o ponto em que um efeito estufa estável se transforme em um efeito estufa descontrolado, Vênus é uma prova clara do fato de que um planeta não pode continuar aquecendo indefinidamente sem uma grande mudança em seus oceanos e atmosfera. É uma conclusão à qual nós e nossos descendentes devemos prestar muita atenção.

10.4 A GEOLOGIA DE MARTE

Marte é mais interessante para a maioria das pessoas do que Vênus porque é mais hospitaleiro. Mesmo à distância da Terra, podemos ver as características da superfície de Marte e acompanhar as mudanças sazonais em suas calotas polares (Fig. 10.10). Embora a superfície hoje seja seca e fria, evidências coletadas por espaçonaves sugerem que Marte já teve céu azul e lagos de água líquida. Ainda hoje, é o tipo de lugar que podemos imaginar astronautas visitando e talvez até estabelecendo bases permanentes.



Figura 10.10: Marte fotografado pelo Telescópio Espacial Hubble. Esta é uma das melhores fotos de Marte tiradas do nosso planeta, obtidas em junho de 2001, quando Marte estava a apenas 68 milhões de quilômetros de distância. A resolução é de cerca de 20 quilômetros – muito melhor do que pode ser obtida com telescópios terrestres, mas ainda insuficiente para revelar a geologia subjacente de Marte.

EXPLORAÇÕES DE MARTE POR NAVES ESPACIAIS

Marte é intensamente investigado por naves espaciais. Mais de 50 naves espaciais foram lançadas em direção a Marte, mas apenas cerca de metade foi totalmente bem-sucedida. A primeira visitante foi a US Mariner 4, que passou por Marte em 1965 e transmitiu 22 fotos para a Terra. Essas fotos mostraram um planeta aparentemente sombrio com crateras de impacto abundantes. Naquela época, as crateras eram inesperadas; algumas pessoas que eram romanticamente inclinadas ainda esperavam ver canais ou algo parecido. De qualquer forma, as manchetes dos jornais anunciavam com tristeza que Marte era um “planeta morto”.

Em 1971, a Mariner 9 da NASA tornou-se a primeira nave espacial a orbitar outro planeta, mapeando toda a superfície de Marte com uma resolução de cerca de 1 quilômetro e descobrindo uma grande variedade de características geológicas, incluindo vulcões, enormes cânions, camadas intrincadas nas calotas polares, e canais que pareciam ter sido cortados por água corrente. Geologicamente, Marte não parecia tão morto, afinal.

A espaçonave gêmea Viking da década de 1970 estava entre as mais ambiciosas e bem-sucedidas de todas as missões planetárias. Dois orbitadores examinaram o planeta e serviram para retransmitir as comunicações para duas sondas na superfície.

Depois de uma busca emocionante e às vezes frustrante por um local de pouso seguro, a sonda Viking 1 pousou na superfície de Chryse Planitia (as Planícies de Ouro) em 20 de julho de 1976, exatamente 7 anos após o primeiro passo histórico de Neil Armstrong na Lua. Dois meses depois, o Viking 2 pousou com igual sucesso em outra planície mais ao norte, chamada Utopia. As sondas fotografaram a superfície com alta resolução e realizaram experimentos complexos em busca de evidências de vida, enquanto as sondas forneceram uma perspectiva global da geologia de Marte.

Marte permaneceu sem ser visitado por duas décadas após a Viking. Mais duas naves espaciais foram lançadas em direção a Marte, pela NASA e pela Agência Espacial Russa, mas ambas falharam antes de chegar ao planeta.

A situação mudou na década de 1990, quando a NASA iniciou um novo programa de exploração usando espaçonaves menores e mais baratas que a Viking. A primeira das novas missões, apropriadamente chamada de Pathfinder, pousou o primeiro rover movido a energia solar na superfície marciana em 4 de julho de 1997 (Fig. 10.11). Um orbitador chamado Mars Global Surveyor (MGS) chegou alguns meses depois e começou a fotografia de alta resolução de toda a superfície ao longo de mais de um ano marciano. A descoberta

mais dramática dessa espaçonave, que ainda está em operação, foi a evidência de ravinas aparentemente cortadas por águas superficiais, como discutiremos mais adiante. Essas missões foram seguidas em 2003 pelo orbitador Mars Odyssey da NASA e pelo orbitador ESA Mars Express, ambos carregando câmeras de alta resolução.

Um espectrômetro de raios gama no Odyssey descobriu uma grande quantidade de hidrogênio subsuperficial (provavelmente na forma de água congelada). Os orbitadores subsequentes incluíram o Mars Reconnaissance Orbiter da NASA para avaliar futuros locais de pouso, o MAVEN para estudar a atmosfera superior e o Mangalyaan da Índia, também focado no estudo das finas camadas de ar de Marte. Vários desses orbitadores também estão equipados para se comunicar com aterrissadores e rovers na superfície e servem como retransmissores de dados para a Terra.



Figura 10.11: Vista da Superfície do Mars Pathfinder. A cena da sonda Pathfinder mostra uma planície varrida pelo vento, esculpida há muito tempo quando a água fluía das terras altas de Marte para a depressão onde a espaçonave pousou. O rover Sojourner, o primeiro veículo com rodas em Marte, é do tamanho de um forno de micro-ondas. Sua parte superior plana contém células solares que forneceram eletricidade para o funcionamento do veículo. Você pode ver a rampa do módulo de pouso e o caminho que o rover fez até a rocha maior que a equipe da missão apelidou de “Yogi”.

Em 2003, a NASA iniciou uma série de pousos em Marte de grande sucesso. Twin Mars Exploration Rovers (MER), chamados Spirit e Opportunity, tiveram sucesso muito além de suas vidas planejadas. A meta de projeto para os rovers era de 600 metros de viagem; na verdade, eles viajaram juntos mais de 50 quilômetros. Depois de explorar sua borda, o

Opportunity desceu as paredes íngremes até uma cratera de impacto chamada Victoria, e conseguiu, com alguma dificuldade, subir de volta para retomar sua rota (Fig. 10.12). A poeira cobrindo as células solares dos rovers causou uma queda na energia, mas quando uma tempestade de poeira sazonal afastou a poeira, os rovers retomaram a operação completa. Para sobreviver ao inverno, os rovers foram posicionados em encostas para maximizar o aquecimento solar e a geração de energia.

Em 2006, a Spirit perdeu potência em uma de suas rodas e, posteriormente, ficou presa na areia, onde continuou operando como estação terrestre fixa. Enquanto isso, em 2008, a Phoenix pousou perto da borda da calota polar norte, na latitude 68°, e mediu diretamente o gelo da água no solo.

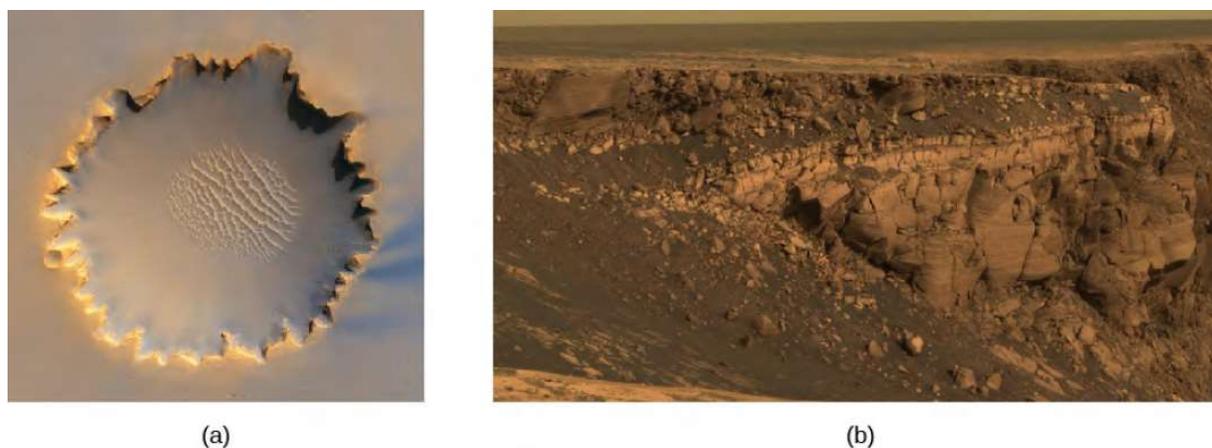


Figura 10.12: Cratera Vitória. (a) Esta cratera em Meridiani Planum tem 800 metros de largura, tornando-a ligeiramente menor que a cratera Meteor na Terra. Observe o campo de dunas no interior. (b) Esta imagem mostra a visão do rover Opportunity enquanto explorava a borda da cratera Victoria procurando uma rota segura para o interior.

Em 2011, a NASA lançou sua maior (e mais cara) missão a Marte desde a Viking. O rover Curiosity de 1 tonelada, do tamanho de um carro compacto, possui geradores elétricos movidos a plutônio, de modo que não depende da luz solar para energia. O Curiosity fez um pouso no chão da cratera Gale, um local selecionado por sua geologia complexa e evidência de que havia sido submersa pela água no passado.

AMOSTRAS MARCIANAS

Muito do que sabemos sobre a Lua, incluindo as circunstâncias de sua origem, vem de amostras trazidas de missões, mas o mesmo ainda não ocorreu com amostras marcianas.

O que temos são amostras marcianas em forma de meteoritos (Fig. 10.13) – rochas que caíram do espaço.



Figura 10.13: Meteorito marciano. Este fragmento de basalto, ejetado de Marte em um impacto de formação de cratera, acabou chegando à superfície da Terra.

Como as rochas escapariam de Marte? Muitos impactos ocorreram no planeta vermelho, como mostra sua superfície cheia de crateras. Fragmentos de grandes impactos podem escapar de Marte, cuja gravidade superficial é apenas 38% da Terra. Muito tempo depois (normalmente alguns milhões de anos), uma fração muito pequena desses fragmentos colidem com a Terra e sobrevivem à sua passagem pela nossa atmosfera, assim como outros meteoritos. A propósito, rochas da Lua também chegaram ao nosso planeta como meteoritos, embora tenhamos conseguido demonstrar apenas sua origem lunar, em comparação com amostras devolvidas pelas missões Apollo.

A maioria dos meteoritos marcianos são basaltos vulcânicos; a maioria deles também é relativamente jovem – cerca de 1,3 bilhão de anos. Sabemos pelos detalhes de sua composição que eles não são da Terra ou da Lua. Além disso, não havia atividade vulcânica na Lua para formá-los há 1,3 bilhão de anos. Seria muito difícil para o material ejetado dos impactos em Vênus escapar através de sua espessa atmosfera. Pelo processo de eliminação, a única origem razoável parece ser Marte, onde os vulcões Tharsis estavam ativos naquela época.

A origem marciana desses meteoritos foi confirmada pela análise de pequenas bolhas de gás presas dentro de vários deles. Essas bolhas correspondem às propriedades atmosféricas de Marte, medidas pela primeira vez diretamente pela Viking. Parece que algum gás atmosférico ficou preso na rocha pelo choque do impacto que o ejetou de Marte. Um dos resultados mais empolgantes da análise dessas amostras marcianas foi a descoberta de compostos de água e orgânicos (à base de carbono), o que sugere que Marte pode ter tido oceanos e talvez até vida em sua superfície. Como já sugerimos, há outras evidências da presença de água corrente em Marte no passado remoto.

PROPRIEDADES GLOBAIS DE MARTE

Marte tem um diâmetro de 6790 quilômetros, pouco mais da metade do diâmetro da Terra, dando-lhe uma área de superfície total quase igual à área continental (terrestre) do nosso planeta. Sua densidade total de $3,9 \text{ g/cm}^3$ sugere uma composição composta principalmente de silicatos, mas com um pequeno núcleo metálico. O planeta não possui campo magnético global, embora existam áreas de forte magnetização de superfície que indicam que havia um campo global há bilhões de anos.

Aparentemente, o planeta vermelho não tem material líquido em seu núcleo hoje que conduziria eletricidade (origem do campo magnético).

Graças ao Mars Global Surveyor, mapeamos todo o planeta, conforme mostrado na Fig. 10.14. Um altímetro a laser a bordo fez milhões de medições separadas da topografia da superfície com uma precisão de alguns metros – boa o suficiente para mostrar até mesmo a deposição anual e a evaporação das calotas polares. Como a Terra, a Lua e Vênus, a superfície de Marte tem áreas continentais ou montanhosas, bem como amplas planícies vulcânicas.

O alcance total em elevação do topo da montanha mais alta (Olympus Mons) até o fundo da bacia mais profunda (Hellas) é de 31 quilômetros.

Aproximadamente metade do planeta consiste em terrenos montanhosos com muitas crateras, encontrados principalmente no hemisfério sul. A outra metade, que está principalmente no norte, contém planícies vulcânicas mais jovens e com poucas crateras a uma altitude média cerca de 5 quilômetros abaixo das terras altas. Lembre-se de que vimos um padrão semelhante na Terra, na Lua e em Vênus. Uma divisão geológica em terras altas mais antigas e planícies baixas mais novas parece ser característica de todos os planetas terrestres, exceto Mercúrio.

Do outro lado da divisão norte-sul de Marte está um continente elevado do tamanho da América do Norte. Esta é a protuberância de Tharsis, com 10 quilômetros de altura, uma região vulcânica coroada por quatro grandes vulcões que se elevam ainda mais alto no céu marciano.

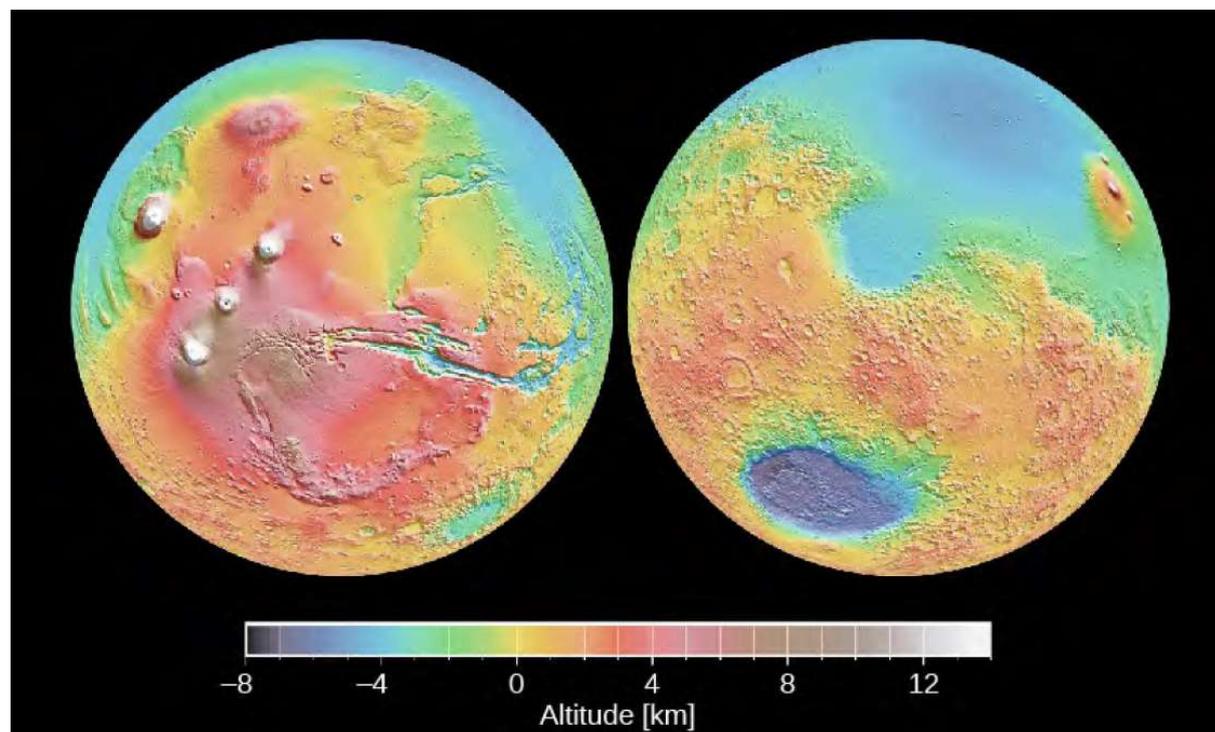


Figura 10.14: Mapa de Marte a partir do Laser Ranging. Esses globos são mapas topográficos altamente precisos, reconstruídos a partir de milhões de medições individuais de elevação feitas com o Mars Global Surveyor. A cor é usada para indicar a elevação. O hemisfério à esquerda inclui a protuberância de Tharsis e o Monte Olimpo, a montanha mais alta de Marte; o hemisfério à direita inclui a bacia de Hellas, que tem a elevação mais baixa em Marte.

VULCOES SOBRE MARTE

As planícies de Marte se parecem muito com os mares lunares e têm aproximadamente a mesma densidade de crateras de impacto. Assim como os maria lunares, eles provavelmente se formaram entre 3 e 4 bilhões de anos atrás. Aparentemente, Marte experimentou extensa atividade vulcânica mais ou menos ao mesmo tempo que a Lua, produzindo lavas basálticas semelhantes.

As maiores montanhas vulcânicas de Marte são encontradas na área de Tharsis (você pode vê-las na Figura 10.14), embora vulcões menores pontilham grande parte da superfície. O

vulcão mais dramático em Marte é Olympus Mons (Monte Olimpo), com um diâmetro maior que 500 quilômetros e um cume que se eleva a mais de 20 quilômetros acima das planícies circundantes – três vezes mais alto que a montanha mais alta da Terra (Fig. 10.15).

O volume deste imenso vulcão é quase 100 vezes maior que o de Mauna Loa, no Havaí.



Figura 10.15: Monte Olimpo, O maior vulcão de Marte, e provavelmente o maior do sistema solar. O Monte Olimpo, ilustrado nesta renderização gerada por computador com base nos dados do altímetro a laser do Mars Global Surveyor. Colocada na Terra, a base do Monte Olimpo cobriria completamente o estado de Missouri; a caldeira, a abertura circular no topo, tem 65 quilômetros de diâmetro, aproximadamente do tamanho de Los Angeles.

RACHADURAS E DESFILADEIROS MARCIANOS

A protuberância de Tharsis tem muitas características geológicas interessantes, além de seus enormes vulcões. Nesta parte do planeta, a própria superfície se elevou, forçada por grandes pressões de subterrâneas, resultando em extensas rachaduras tectônicas da crosta. Entre as feições tectônicas mais espetaculares de Marte estão os cânions chamados Valles Marineris (ou Mariner Valleys, em homenagem ao Mariner 9, que os revelou pela primeira vez a nós), que são mostrados na Fig. 10.16. Eles se estendem por cerca de 5.000 quilômetros (quase um quarto do caminho ao redor de Marte) ao longo das encostas das protuberâncias de Tharsis. O cânion principal tem cerca de 7 quilômetros de profundidade

e até 100 quilômetros de largura, grande o suficiente para que o Grand Canyon do rio Colorado caiba confortavelmente em um de seus cânions laterais.

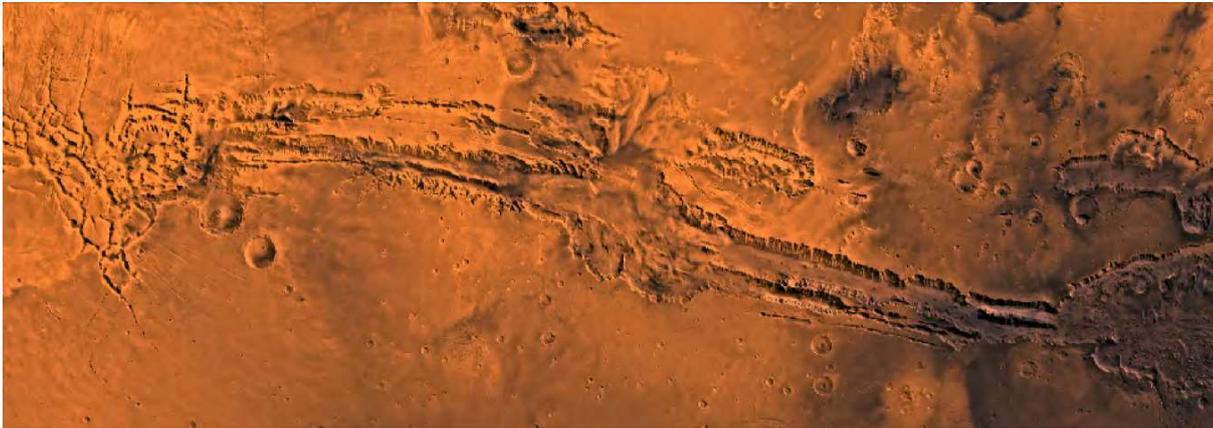


Figura 10.16: Canyonlands fortemente erodidos em Marte. Esta imagem mostra o complexo do cânion Valles Marineris, que tem 3.000 quilômetros de largura e 8 quilômetros de profundidade.

O termo “canyon” é um pouco enganador aqui porque os canyons Valles Marineris não têm saídas e não foram cortados por água corrente. São basicamente rachaduras tectônicas, produzidas pelas mesmas tensões crustais que causaram o soerguimento de Tharsis. No entanto, a água desempenhou um papel posterior na formação dos cânions, principalmente por infiltrar-se de nascentes profundas e rebaixar as falésias. Esse rebaixamento levou a deslizamentos de terra que gradualmente ampliaram as rachaduras originais nos grandes vales que vemos hoje (Fig. 10.17). Hoje, a principal forma de erosão nos cânions é provavelmente o vento.

Embora a protuberância de Tharsis e Valles Marineris sejam impressionantes, em geral, vemos menos estruturas tectônicas em Marte do que em Vênus. Em parte, isso pode refletir um nível geral mais baixo de atividade geológica, como seria esperado para um planeta menor. Mas também é possível que evidências de falhas generalizadas tenham sido enterradas por depósitos de vento sedimentos sobre grande parte de Marte. Como a Terra, Marte pode ter escondido parte de sua história geológica sob um manto de solo.



Figura 10.17: Deslizamentos de terra marcianos. Esta imagem orbital Viking mostra Ophir Chasma, um dos vales conectados do sistema de cânions Valles Marineris. Olhe com atenção e você verá enormes deslizamentos de terra cujos detritos estão empilhados sob a parede do penhasco, que se elevam até 10 quilômetros acima do fundo do cânion.

A VISTA NA SUPERFÍCIE MARCIANA

As primeiras espaçonaves a pousar com sucesso em Marte foram as Vikings 1 e 2 e a Mars Pathfinder. Todos enviaram fotos que mostravam uma paisagem desolada, mas estranhamente bela, incluindo numerosas rochas angulares intercaladas com dunas como depósitos de solo avermelhado de granulação fina (Fig. 10.18).



Figura 10.18: Três Locais de Aterrissagem em Marte. Os aterrissadores de Marte Viking 1 em Chryse, Pathfinder em Ares Valley e Viking 2 em Utopia, todos fotografaram seus arredores. É evidente, pela semelhança dessas três fotos, que cada espaçonave pousou em uma planície plana e varrida pelo vento, repleta de rochas que variam de pequenos seixos a pedregulhos do tamanho de um metro. É provável que a maior parte de Marte se pareça com isso na superfície.

Todos os três landers foram direcionados para terrenos relativamente planos e de várzea. Instrumentos nas sondas descobriram que o solo consistia de argila e óxidos de ferro, como há muito se esperava da cor vermelha do planeta. Todas as rochas medidas pareciam ser de origem vulcânica e aproximadamente da mesma composição. Landers posteriores foram direcionados para pousar em áreas que aparentemente foram inundadas em algum momento do passado, onde as camadas de rochas sedimentares, formadas na presença de água, são comuns. (Embora devamos notar que quase todo o planeta está coberto por pelo menos uma fina camada de poeira soprada pelo vento).

As sondas Viking incluíam estações meteorológicas que operaram por vários anos, fornecendo uma perspectiva do clima marciano. As temperaturas que eles mediram variaram muito com as estações, devido à ausência de oceanos moderados e nuvens. Normalmente, a temperatura máxima de verão no Viking 1 foi de 240 K ($-33\text{ }^{\circ}\text{C}$), caindo para 190 K ($-83\text{ }^{\circ}\text{C}$) no mesmo local pouco antes do amanhecer. As temperaturas mais baixas, medidas mais ao norte pela Viking 2, foram de cerca de 173 K ($-100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Durante o inverno, a Viking 2 também fotografou depósitos de gelo no solo (Fig. 10.19). Fazemos questão de dizer “geada de água” aqui porque em alguns locais em Marte, fica frio o suficiente para que o dióxido de carbono (gelo seco) congele da atmosfera também.

A maioria dos ventos medidos em Marte são de apenas alguns quilômetros por hora. No entanto, Marte é capaz de grandes tempestades de vento que podem cobrir todo o planeta com poeira soprada pelo vento. Esses ventos fortes podem retirar da superfície parte de sua poeira fina e solta, deixando a rocha exposta. Os rovers posteriores descobriram que a cada tarde ensolarada a atmosfera se tornava turbulenta à medida que o calor subia da superfície. Essa turbulência gerou redemoinhos de poeira, que desempenham um papel importante no levantamento da poeira fina para a atmosfera. À medida que os redemoinhos de poeira retiram a camada superior de poeira leve e expõem o material mais escuro por baixo, eles podem produzir padrões fantásticos no solo (Fig. 10.20).

O vento em Marte desempenha um papel importante na redistribuição do material da superfície. A Fig. 10.20 mostra uma bela área de dunas de areia escura em cima de material mais claro. Grande parte do material retirado dos cânions marcianos foi despejado em extensos campos de dunas como este, principalmente em altas latitudes.

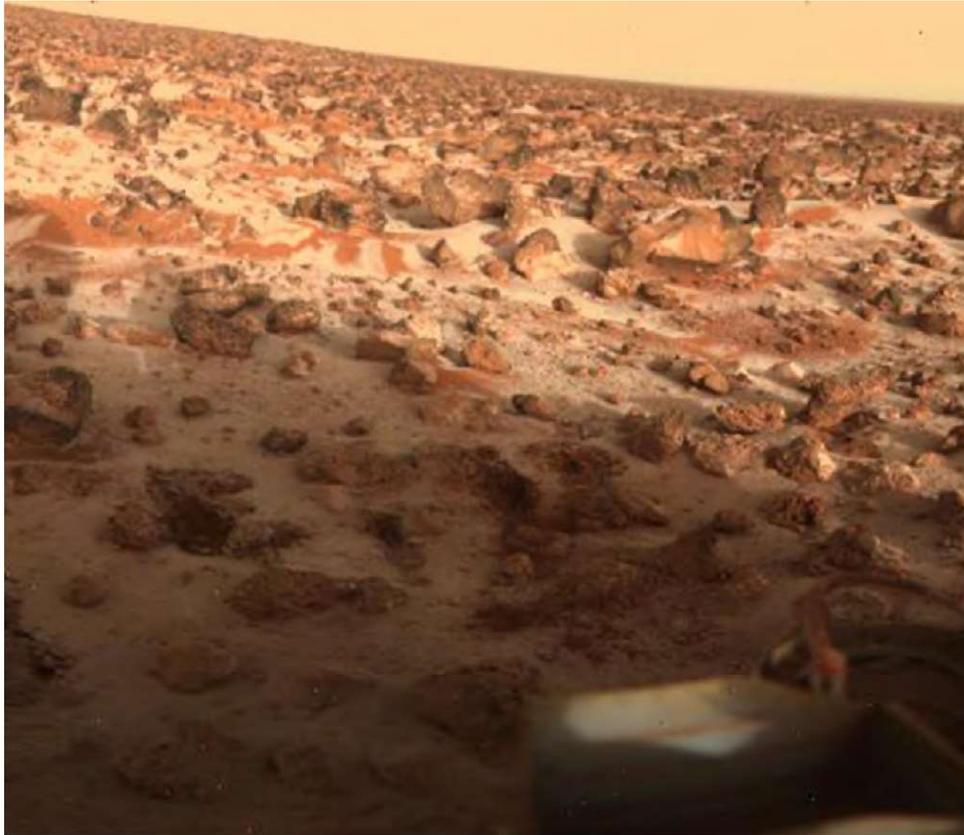
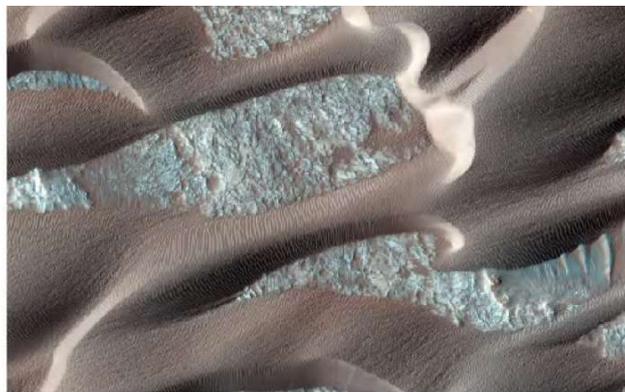


Figura 10.19: Water Frost in Utopia. Esta imagem da geada da superfície foi fotografada no local de pouso do Viking 2 durante o final do inverno.



(a)



(b)

Figura 10.20: Dust Devil Tracks e Dunas de Areia. (a) Esta foto de alta resolução do Mars Global Surveyor mostra os rastros escuros de vários diabos de poeira que removeram uma fina camada de poeira de cor clara. Esta vista é de uma área de cerca de 3 quilômetros de diâmetro. Os diabos de poeira (Dust Devil) são uma das maneiras mais importantes que a poeira é redistribuída pelos ventos marcianos. Eles também podem ajudar a manter os painéis solares de nossos rovers livres de poeira. (b) Essas dunas de areia sopradas pelo vento em Marte cobrem uma superfície arenosa mais clara. Cada duna nesta visão de alta resolução tem cerca de 1 quilômetro de diâmetro.

10.5 ÁGUA E VIDA EM MARTE

De todos os planetas e luas do sistema solar, Marte parece ser o lugar mais promissor para procurar vida, tanto micróbios fósseis quanto (esperamos) algumas formas de vida subterrâneas mais profundas que ainda sobrevivem hoje. Mas onde (e como) devemos procurar a vida? Sabemos que o único requisito compartilhado por toda a vida na Terra é a água líquida. Portanto, o princípio orientador na avaliação da habitabilidade em Marte e em outros lugares tem sido “seguir a água”. Essa é a perspectiva que adotamos nesta seção, seguir a água no planeta vermelho e esperar que ela nos leve à vida.

ATMOSFERA E NUVENS EM MARTE

A atmosfera de Marte hoje tem uma pressão superficial média de apenas 0,007 bar, menos de 1% do da Terra. (Esta é a espessura do ar cerca de 30 quilômetros acima da superfície da Terra.) O ar marciano é composto principalmente de dióxido de carbono (95%), com cerca de 3% de nitrogênio e 2% de argônio. As proporções de diferentes gases são semelhantes às da atmosfera de Vênus (veja a Tab. 10.2), mas muito menos de cada gás é encontrado no ar rarefeito de Marte.

Embora os ventos em Marte possam atingir altas velocidades, eles exercem muito menos força do que o vento da mesma velocidade na Terra, porque a atmosfera é muito fina. O vento é capaz, no entanto, de lançar partículas de poeira muito finas, que às vezes podem desenvolver tempestades de poeira em todo o planeta. É essa poeira fina que cobre quase toda a superfície, dando a Marte sua distinta cor vermelha. Na ausência de água superficial, a erosão eólica desempenha um papel importante na escultura da superfície marciana (Fig. 10.21).

Embora a atmosfera contenha pequenas quantidades de vapor de água e nuvens ocasionais de água gelada, a água líquida não é estável nas condições atuais em Marte. Parte do problema são as baixas temperaturas do planeta. Mas mesmo que a temperatura em um dia ensolarado de verão suba acima do ponto de congelamento, a baixa pressão significa que a água líquida ainda não pode existir na superfície, exceto nas elevações mais baixas. A uma pressão inferior a 0,006 bar, o ponto de ebulição é tão baixo ou inferior ao ponto de congelamento, e a água muda diretamente de sólido para vapor sem um estado líquido intermediário (como o “gelo seco”, dióxido de carbono, na Terra). No entanto, os sais

dissolvidos na água diminuem seu ponto de congelamento, como sabemos pela maneira como o sal é usado para descongelar estradas após a formação de neve e gelo durante o inverno na Terra. A água salgada é, portanto, às vezes capaz de existir em forma líquida na superfície marciana, nas condições certas.



Figura 10.21: Erosão Eólica em Marte. Essas longas cristas retas, chamadas yardangs (jardas), estão alinhadas com a direção do vento dominante. Esta é uma imagem de alta resolução do Mars Reconnaissance Orbiter e tem cerca de 1 quilômetro de largura.

Vários tipos de nuvens podem se formar na atmosfera marciana. Primeiro, há nuvens de poeira, discutidas acima. Em segundo lugar estão as nuvens de gelo de água semelhantes às da Terra. Estes geralmente se formam em torno de montanhas, assim como acontece em nosso planeta. Finalmente, o CO₂ da atmosfera pode se condensar em grandes altitudes para formar névoas de cristais de gelo seco. As nuvens de CO₂ não têm contrapartida na Terra, já que em nosso planeta as temperaturas nunca caem o suficiente (até cerca de 150 K ou cerca de -125 ° C) para que esse gás se condense.

AS CALOTAS POLARES

Através de um telescópio, as características de superfície mais proeminentes em Marte são as calotas polares brilhantes, que mudam com as estações, semelhantes à cobertura de neve sazonal na Terra. Normalmente não pensamos na neve do inverno nas latitudes do norte como parte de nossas calotas polares, mas vista do espaço, a neve fina do inverno

se funde com as calotas de gelo espessas e permanentes da Terra para criar uma impressão muito parecida com a vista em Marte (Fig. 10.22).

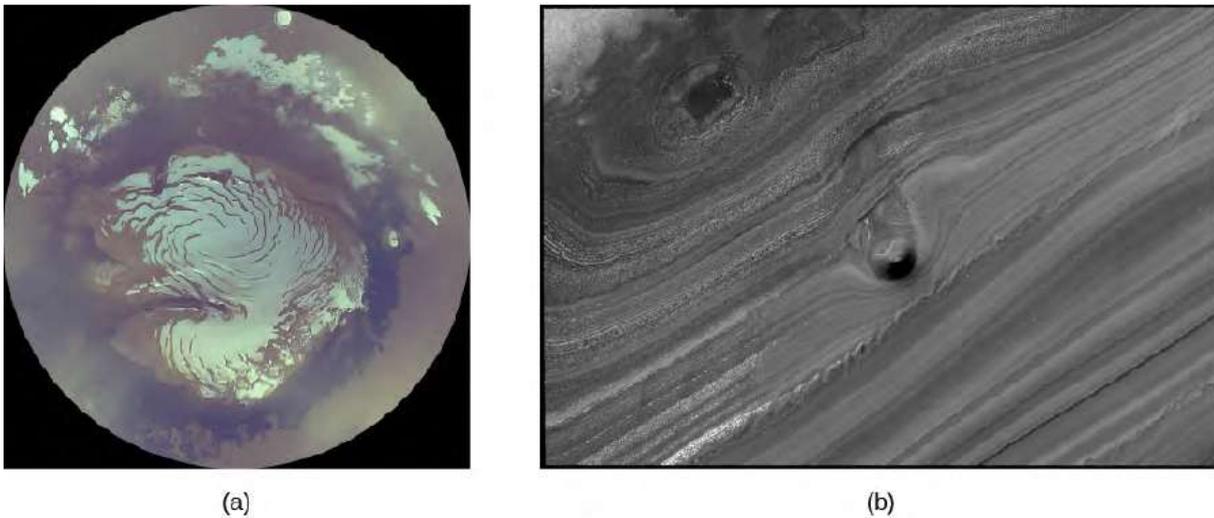


Figura 10.22: Calota Polar Norte de Marte. (a) Esta é uma imagem composta do pólo norte no verão, obtida em outubro de 2006 pela Mars Reconnaissance Orbiter. Ele mostra o resíduo principalmente de gelo de água sobre sedimentos em camadas claras, de cor bronzeada. Observe que, embora a borda desta foto seja circular, ela mostra apenas uma pequena parte do planeta. (b) Aqui vemos uma pequena seção do terreno em camadas perto do pólo norte marciano. Há um monte de cerca de 40 metros de altura que está saindo de uma calha no centro da imagem.

As calotas sazonais de Marte são compostas não de neve comum, mas de CO_2 congelado (gelo seco). Esses depósitos condensam-se diretamente da atmosfera quando a temperatura da superfície cai abaixo de cerca de 150 K. As calotas se desenvolvem durante os frios invernos marcianos e se estendem até cerca de 50° de latitude no início da primavera.

Bem distintas dessas finas capas sazonais de CO_2 são as capas permanentes ou residuais que estão sempre presentes perto dos pólos. A calota permanente sul tem um diâmetro de 350 quilômetros e é composta por depósitos de CO_2 congelados juntamente com uma grande quantidade de gelo de água. Durante todo o verão do sul, permanece no ponto de congelamento de CO_2 , 150 K, e esse reservatório a baixa temperatura é espesso o suficiente para sobreviver intacto ao calor do verão.

Ao norte as características da cobertura de gelo permanente são diferentes. É muito maior, nunca encolhendo para um diâmetro inferior a 1.000 quilômetros, e é composto de gelo de água. As temperaturas de verão no norte são muito altas para que o CO_2 congelado seja retido. As medições do Mars Global Surveyor estabeleceram as elevações exatas da região norte polar de Marte, mostrando que é uma grande bacia do tamanho da nossa própria

bacia do Oceano Ártico. A calota de gelo em si tem cerca de 3 quilômetros de espessura, com um volume total de cerca de 10 milhões de km³ (semelhante ao do Mar Mediterrâneo da Terra). Se Marte tivesse água líquida, essa bacia polar norte teria um mar raso. Há alguma indicação de linhas costeiras antigas visíveis, mas serão necessárias melhores imagens para verificar essa possibilidade.

Imagens tiradas da órbita também mostram um tipo distinto de terreno ao redor das calotas polares permanentes, conforme mostrado na Fig. 10.22. Em latitudes acima de 80° em ambos os hemisférios, a superfície consiste em depósitos em camadas recentes que cobrem o antigo solo de crateras abaixo. Camadas individuais são tipicamente de dez a algumas dezenas de metros de espessura, marcada pela alternância de faixas claras e escuras de sedimentos. Provavelmente o material nos depósitos polares inclui poeira transportada pelo vento das regiões equatoriais de Marte.

O que essas camadas em terraço nos dizem sobre Marte? Algum processo cíclico está depositando poeira e gelo ao longo de períodos de tempo. As escalas de tempo representadas pelas camadas polares são dezenas de milhares de anos. Aparentemente, o clima marciano experimenta mudanças periódicas em intervalos semelhantes aos das eras glaciais da Terra. Os cálculos indicam que as causas provavelmente também são semelhantes: a atração gravitacional dos outros planetas produz variações na órbita e inclinação de Marte à medida que o grande mecanismo do sistema solar avança.

A espaçonave Phoenix pousou perto da calota polar norte no verão (Fig. 10.23). Os controladores sabiam que não seria capaz de sobreviver a um inverno polar, mas medir diretamente as características da região polar foi considerado importante o suficiente para enviar uma missão. A descoberta mais emocionante veio quando a espaçonave tentou cavar uma trincheira rasa sob a espaçonave. Quando a poeira sobrejacente foi removida, eles viram um material branco brilhante, aparentemente algum tipo de gelo. Pela maneira como esse gelo sublimava nos dias seguintes, ficou claro que era água congelada.

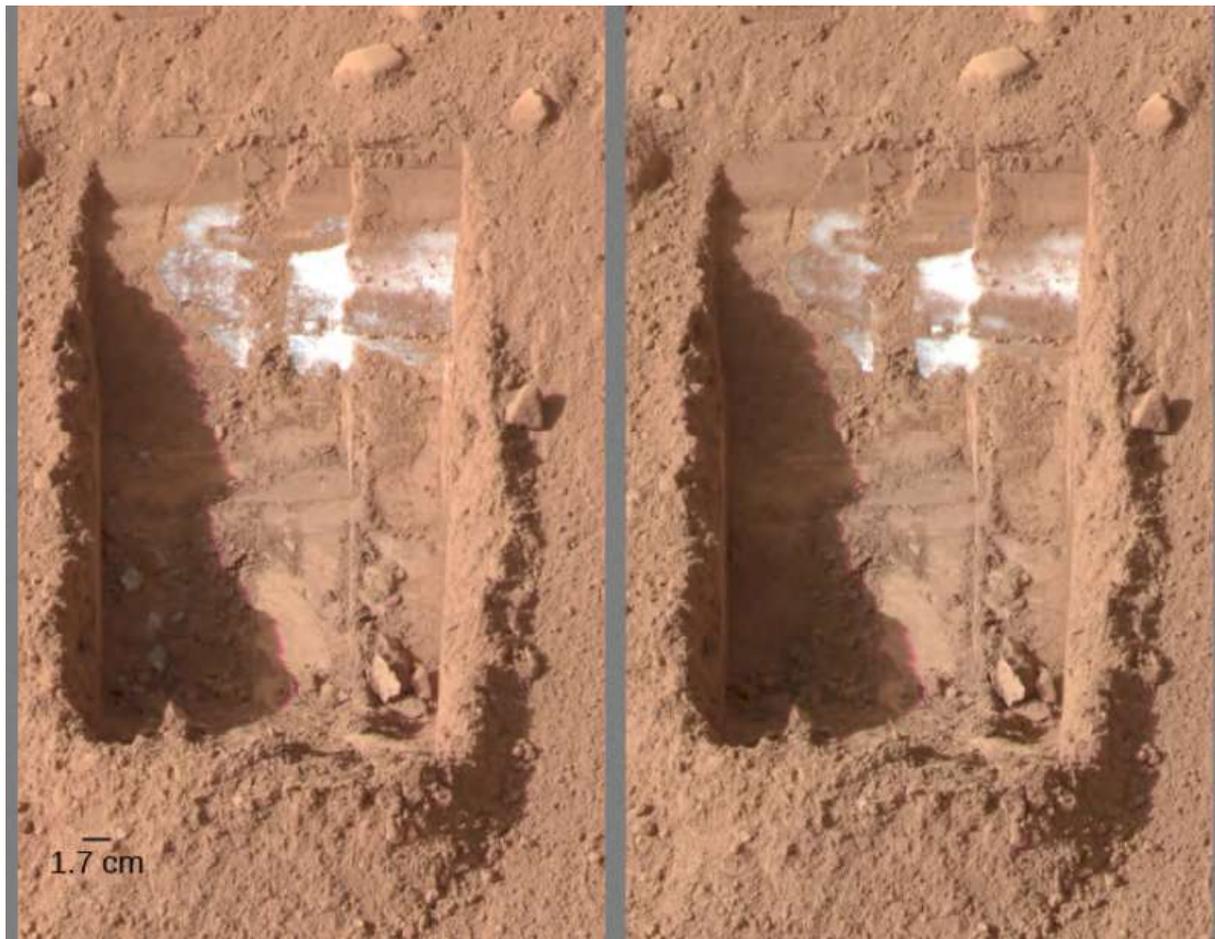


Figura 10.23: Evaporando Gelo em Marte. Vemos uma trincheira cavada pela sonda Phoenix na região polar norte com quatro dias marcianos em junho de 2008. Se você olhar para a região sombreada no canto inferior esquerdo da trincheira, poderá ver três manchas de gelo na imagem da esquerda que foram sublimadas na imagem da direita.

CANAIS E RAVINAS EM MARTE

Embora não existam corpos de água líquida em Marte hoje, acumularam-se evidências de que os rios fluíram no planeta vermelho há muito tempo. Dois tipos de características geológicas parecem ser remanescentes de antigos cursos de água, enquanto uma terceira classe – ravinas menores – sugere surtos intermitentes de água líquida até hoje. Examinaremos cada um desses recursos por sua vez.

Nas planícies equatoriais das terras altas, existem inúmeros canais pequenos e sinuosos (torcidos) – normalmente com alguns metros de profundidade, algumas dezenas de metros de largura e talvez 10 ou 20 quilômetros de comprimento (Fig. 10.24). Eles são chamados de runoff channels (semelhantes à sistemas fluviais terrestres, foram formados quando água subterrânea ou chuva foi coletada de uma grande região) porque se parecem com o

que os geólogos esperariam do escoamento superficial de chuvas (o que poderia ter ocorrido a muito tempo). Esses canais de escoamento parecem estar nos dizendo que o planeta tinha um clima muito diferente há muito tempo. Para estimar a idade desses canais, observamos o registro de crateras. As contagens de crateras mostram que esta parte do planeta tem mais crateras do que a maria lunar, mas menos crateras do que as terras altas lunares. Assim, os canais de escoamento são provavelmente mais antigos que os mares lunares, presumivelmente com cerca de 4 bilhões de anos.

O segundo conjunto de características relacionadas à água que vemos são os chamados *outflow channels* (foram cortados por grandes inundações que ocorreram quando grandes poças de água foram produzidas repentinamente em uma região local) (Fig. 10.24) que são muito maiores do que os runoff channels. O maior deles, que desemboca na bacia de Chryse, onde o Pathfinder desembarcou, tem 10 quilômetros ou mais de largura e centenas de quilômetros de comprimento. Muitas características desses canais de escoamento convenceram os geólogos de que eles foram esculpidos por enormes volumes de água corrente, grandes demais para serem produzidos por chuvas comuns. De onde poderia ter vindo tanta água de inundação em Marte?



(a)



(b)

Figura 10.24: Runoff and Outflow Channels. (a) Esses runoff nas antigas terras altas marcianas são interpretados como os vales de rios antigos alimentados pela chuva ou por nascentes subterrâneas. A largura desta imagem é de cerca de 200 quilômetros. (b) Este canal intrigante, chamado Nanedi Valles, se assemelha aos leitos dos rios da Terra em alguns (mas não em todos) aspectos. As curvas apertadas e terraços vistos no canal certamente sugerem o fluxo sustentado de um fluido como a água. O canal tem cerca de 2,5 quilômetros de diâmetro.

Até onde sabemos, as regiões onde se originam os outflow channels continham água em abundância congelada no solo como permafrost. Alguma fonte local de aquecimento deve ter liberado essa água, levando a um período de inundações rápidas e catastróficas. Talvez esse aquecimento esteja associado à formação das planícies vulcânicas em Marte, que datam aproximadamente da mesma época dos canais de escoamento.

Observe que nem os Runoff e Outflow Channels são largos o suficiente para serem visíveis da Terra, nem seguem linhas retas. Não poderiam ser os “canais” que Percival Lowell imaginava ver no planeta vermelho.

O terceiro tipo de recurso de água, as ravinas menores (ravina ou barranco é um acidente geográfico produto de erosão pela ação de córregos e enxurradas), foi descoberto pela Mars Global Surveyor (Fig. 10.25).

As imagens da câmera do Mars Global Surveyor alcançaram uma resolução de alguns metros, boa o suficiente para ver algo tão pequeno quanto um caminhão ou ônibus na superfície. Nas paredes íngremes de vales e crateras em altas latitudes, há muitas características erosivas que parecem ravinas esculpidas pela água corrente. Essas ravinas são muito jovens: não apenas não há crateras de impacto sobrepostas, mas em alguns casos, as ravinas parecem cortar dunas recentes depositadas pelo vento. Talvez haja água líquida no subsolo que ocasionalmente pode irromper para produzir fluxos superficiais de curta duração antes que a água possa congelar ou evaporar.

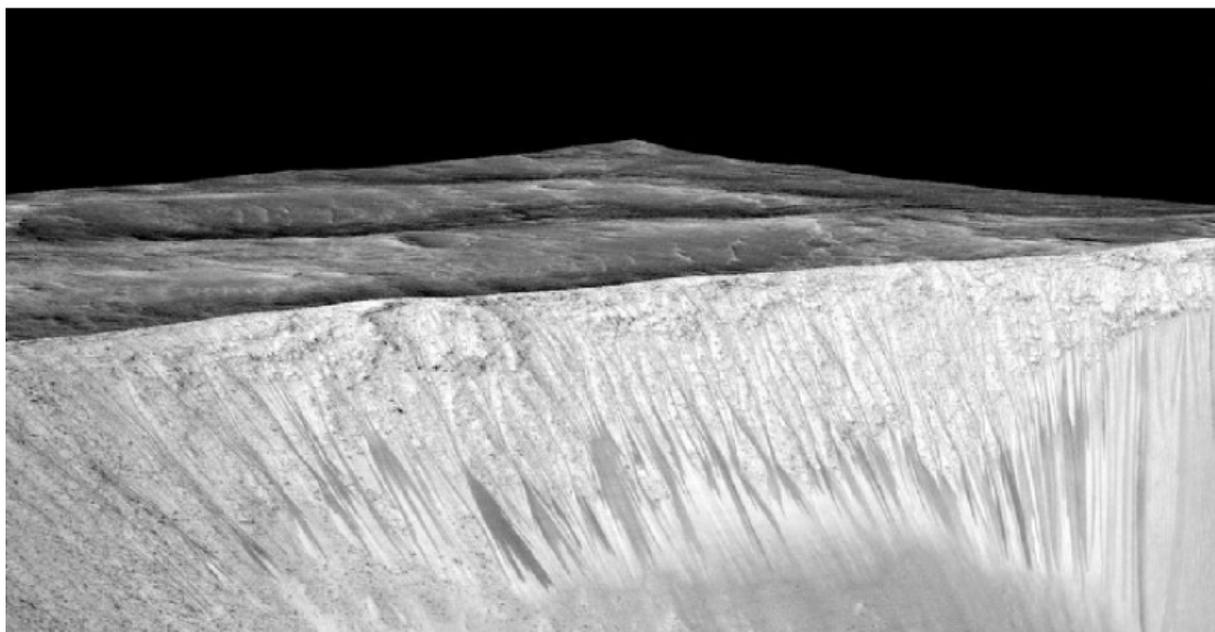


Figura 10.25: Ravinas na Muralha da Cratera Garni. Esta imagem de alta resolução é da Mars Reconnaissance Orbiter. As faixas escuras, cada uma com várias centenas de metros de comprimento, mudam em um padrão sazonal que sugere que são causadas pelo fluxo temporário da água superficial.

As ravinas também têm a notável propriedade de mudar regularmente com as estações marcianas. Muitas das faixas escuras (visíveis na Fig. 10.25) se alongam em um período de alguns dias, indicando que algo está fluindo morro abaixo – seja água ou sedimento escuro. Se for água, requer uma fonte contínua, seja da atmosfera ou de nascentes que drenam as camadas de água subterrâneas (aquíferos). A água subterrânea seria a possibilidade mais excitante, mas esta explicação parece inconsistente com o fato de que muitas das faixas começam em altas elevações nas paredes das crateras.

Evidências adicionais de que as listras escuras (chamadas pelos cientistas de linhas de declive recorrentes) são causadas pela água foram encontradas em 2015, quando foram obtidos espectros das listras escuras (Fig. 10.26). Estes mostraram a presença de sais hidratados produzidos pela evaporação da água salgada. Se a água for salgada, pode permanecer líquida por tempo suficiente para fluir rio abaixo por distâncias de cem metros ou mais, antes de evaporar ou penetrar no solo. No entanto, esta descoberta ainda não identifica a fonte final da água.

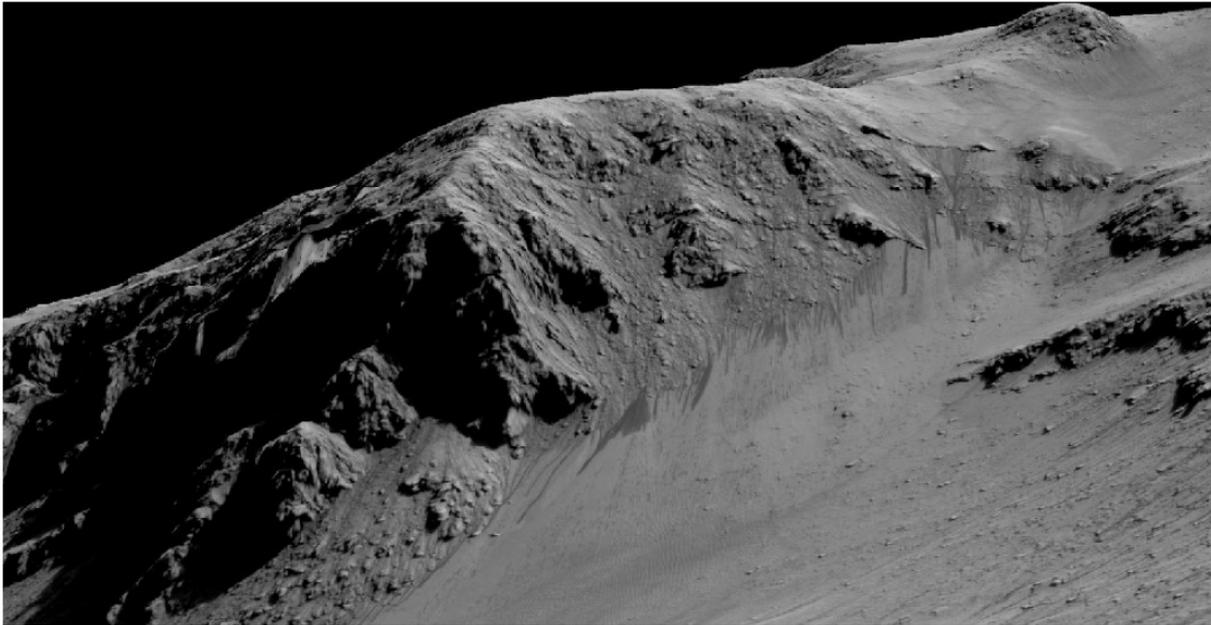


Figura 10.26: Evidência de Água Líquida em Marte. As faixas escuras na cratera Horowitz, que se movem para baixo, foram chamadas de linhas de encosta recorrentes. As listras no centro da imagem descem pela parede da cratera por cerca de 100 metros. Os espectros obtidos nesta região indicam que estes são locais onde a água líquida salgada flui sobre ou logo abaixo da superfície de Marte.

LAGOS ANTIGOS

Os rovers (Spirit, Opportunity e Curiosity) que operaram na superfície de Marte foram usados para caçar evidências adicionais de água. Eles não conseguiram chegar aos locais mais interessantes, como as ravinas, localizadas em encostas íngremes. Em vez disso, eles exploraram locais que podem ser leitos de lagos secos, que remontam a uma época em que o clima em Marte era mais quente e a atmosfera mais espessa – permitindo que a água fosse líquida na superfície.

O Spirit foi especificamente direcionado para explorar o que parecia ser um antigo leito de lago na cratera Gusev, com um canal de escoamento desaguando nele. No entanto, quando a espaçonave pousou, descobriu que o antigo leito do lago estava coberto por finos fluxos de lava, bloqueando o acesso do rover às rochas sedimentares que esperava encontrar.

No entanto, o Opportunity teve mais sorte. Olhando para as paredes de uma pequena cratera, detectou rochas sedimentares em camadas. Essas rochas continham evidências químicas de evaporação, sugerindo que havia um lago salgado raso naquele local. Nessas rochas sedimentares também havia pequenas esferas ricas no mineral hematita, que se forma apenas em ambientes aquosos. Aparentemente, esta bacia muito grande já esteve debaixo d'água.

O rover Curiosity pousou dentro da cratera Gale, onde fotos tiradas da órbita também sugeriram a erosão hídrica do passado. Descobriu numerosas rochas sedimentares, algumas na forma de lamitos (é uma rocha sedimentar formada pela litificação de silte e argila em proporções variáveis) de um antigo leito de lago; também encontrou indícios de rochas formadas pela ação de águas rasas no momento em que o sedimento se formou (Fig. 10.27).



Figura 10.27: Cratera Gale. (a) Esta cena, fotografada pelo rover Curiosity, mostra um antigo leito de lago de lamitos rachados. (b) Os geólogos que trabalham com o rover Curiosity interpretam esta imagem de arenito com camadas cruzadas na cratera Gale como evidência de água líquida passando sobre um leito solto de sedimentos no momento em que essa rocha se formou.

ASTRONOMIA E PSEUDOCIÊNCIA: O “ROSTO EM MARTE”

As pessoas gostam de rostos humanos. Nós, humanos, desenvolvemos grande habilidade em reconhecer pessoas e interpretar expressões faciais. Também temos a tendência de ver rostos em muitas formações naturais, desde nuvens até o homem na Lua. Uma das curiosidades que surgiram do mapeamento global de Marte dos orbitadores Viking foi a descoberta de uma mesa (*mesa é um acidente geográfico caracterizado por uma área elevada de solo com um topo plano, rodeada por todos os lados por escarpas inclinadas*) de formato estranho na região de Cydonia que se assemelhava a um rosto humano.

Apesar dos rumores posteriores de um encobrimento, o “*Face on Mars*” foi, de fato, reconhecido pelos cientistas da Viking e incluído em um dos primeiros comunicados de imprensa da missão. Na baixa resolução e iluminação oblíqua sob a qual a imagem Viking foi obtida, a mesa de uma milha de largura tinha uma aparência semelhante à da Esfinge. Infelizmente, um pequeno grupo de indivíduos decidiu que esta formação era uma escultura artificial esculpida de um rosto humano colocado em Marte por uma antiga

civilização que prosperou lá centenas de milhares de anos atrás. Um bando de “*verdadeiros crentes*” cresceu ao redor do rosto e tentou deduzir a natureza dos “escultores” que o fizeram. Este grupo também ligou o rosto a uma variedade de outros fenômenos pseudocientíficos, como círculos nas plantações (padrões em campos de grãos, principalmente na Grã-Bretanha, agora conhecidos por serem obra de brincalhões).

Em 5 de abril de 1998, na órbita 220, o MOC (câmera de alta resolução Mars Observer, da missão Mars Global Surveyor, que chegou a Marte em 1997) obteve uma imagem oblíqua da face com uma resolução de 4 metros por pixel, uma melhoria de fator de 10 na resolução sobre a imagem Viking. Outra imagem em 2001 tinha resolução ainda maior. Imediatamente divulgadas pela NASA, as novas imagens mostraram uma colina baixa semelhante a uma mesa cortada transversalmente por várias cristas e depressões aproximadamente lineares, que foram identificadas erroneamente na foto de 1976 como os olhos e a boca de um rosto. As imagens originais e de maior resolução podem ser vistas na Fig. 10.28.

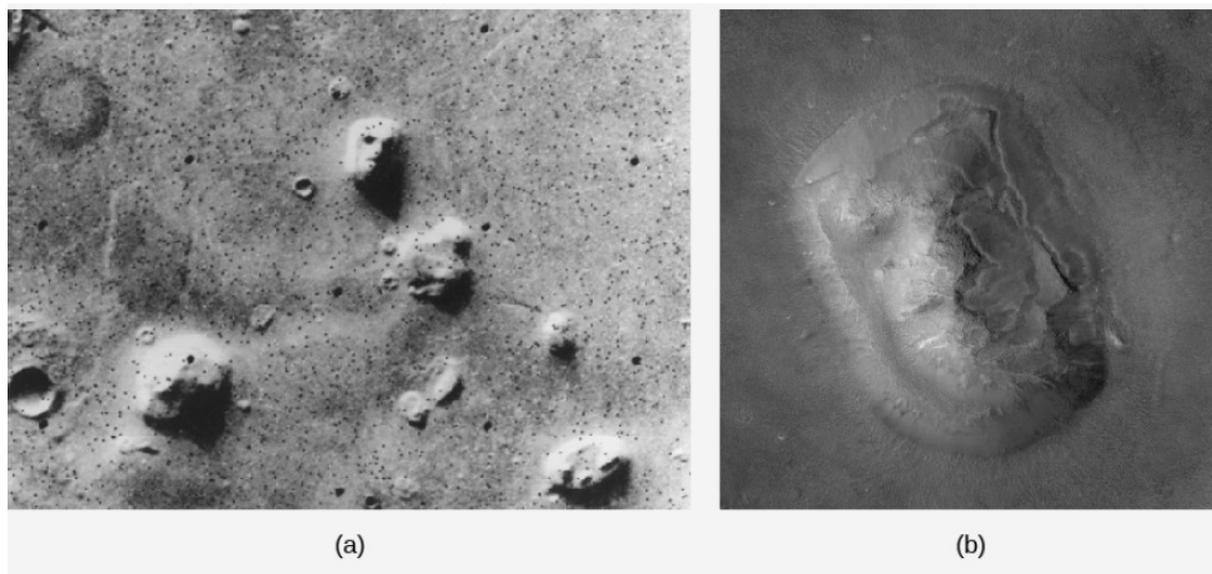


Figura 10.28: Face em Marte. O chamado “Face on Mars” é visto (a) em baixa resolução da Viking (o “face” está na parte superior da imagem) e (b) com resolução 20 vezes melhor do Mars Global Surveyor.

MUDANÇA CLIMÁTICA EM MARTE

As evidências sobre antigos rios e lagos de água em Marte discutidas até agora sugerem que, bilhões de anos atrás, as temperaturas marcianas devem ter sido mais quentes e a atmosfera

deve ter sido diferente do que é hoje. Mas o que poderia ter mudado o clima de Marte de forma tão dramática?

Presumimos que, como a Terra e Vênus, Marte provavelmente se formou com uma temperatura de superfície mais alta graças ao efeito estufa. Mas Marte é um planeta menor, e sua gravidade menor significa que os gases atmosféricos podem escapar mais facilmente do que da Terra e de Vênus. À medida que mais e mais da atmosfera escapava para o espaço, a temperatura na superfície caiu gradualmente.

Eventualmente, Marte ficou tão frio que a maior parte da água congelou, assim como da atmosfera, reduzindo ainda mais sua capacidade de reter calor. O planeta experimentou uma espécie de efeito “refrigerador descontrolado”, exatamente o oposto do efeito estufa descontrolado que ocorreu em Vênus. Provavelmente, essa perda de atmosfera ocorreu em menos de um bilhão de anos após a formação de Marte. O resultado é o Marte frio e seco que vemos hoje.

As condições alguns metros abaixo da superfície marciana, no entanto, podem ser muito diferentes. Lá, a água líquida (especialmente a água salgada) pode persistir, mantida aquecida pelo calor interno de Marte ou pelas camadas isolantes sólidas e rochosas. Mesmo na superfície, pode haver maneiras de mudar temporariamente a atmosfera marciana.

Marte provavelmente experimentará ciclos climáticos de longo prazo, que podem ser causados pela mudança de órbita e inclinação do planeta. Às vezes, uma ou ambas as calotas polares podem derreter, liberando uma grande quantidade de vapor de água na atmosfera. Talvez um impacto ocasional de um cometa possa produzir uma atmosfera temporária suficientemente espessa para permitir a presença de água líquida na superfície por algumas semanas ou meses. Alguns até sugeriram que a tecnologia futura pode nos permitir terraformar Marte – ou seja, projetar sua atmosfera e clima de maneiras que possam tornar o planeta mais hospitaleiro para a habitação humana a longo prazo.

A BUSCA POR VIDA EM MARTE

Se havia água corrente em Marte no passado, talvez também houvesse vida. Poderia a vida, de alguma forma, permanecer no solo marciano hoje? Testar essa possibilidade, embora improvável, era um dos principais objetivos das sondas Viking em 1976. Essas sondas carregavam laboratórios biológicos em miniatura para testar microrganismos no solo marciano. O solo marciano foi recolhido pelo longo braço da espaçonave e colocado nas

câmaras experimentais, onde foi isolado e incubado em contato com uma variedade de gases, isótopos radioativos e nutrientes para ver o que aconteceria. Os experimentos buscavam evidências de respiração de animais vivos, absorção de nutrientes oferecidos a organismos que pudessem estar presentes e troca de gases entre o solo e seu entorno por qualquer motivo. Um quarto instrumento pulverizou o solo e o analisou cuidadosamente para determinar que material orgânico ele continha.

Os experimentos da Viking foram tão sensíveis que, se uma das espaçonaves tivesse pousado em qualquer lugar da Terra (com a possível exceção da Antártida), ela teria facilmente detectado vida. Mas, para decepção de muitos cientistas e membros do público, nenhuma vida foi detectada em Marte. Os testes do solo para absorção de nutrientes e trocas gasosas mostraram alguma atividade, mas isso provavelmente foi causado por reações químicas que começaram quando a água foi adicionada ao solo e não teve nada a ver com a vida. De fato, esses experimentos mostraram que o solo marciano parece muito mais ativo quimicamente do que os solos terrestres por causa de sua exposição à radiação ultravioleta solar (já que Marte não tem camada de ozônio).

O experimento de química orgânica não mostrou nenhum vestígio de material orgânico, que aparentemente é destruído na superfície marciana pelo efeito esterilizante dessa luz ultravioleta. Embora a possibilidade de vida na superfície não tenha sido eliminada, a maioria dos especialistas a considera insignificante. Embora Marte tenha o ambiente mais parecido com a Terra de todos os planetas no sistema solar, o fato triste é que ninguém parece estar em casa hoje, pelo menos na superfície.

No entanto, não há razão para pensar que a vida não poderia ter começado em Marte há cerca de 4 bilhões de anos, ao mesmo tempo em que começou na Terra. Os dois planetas tinham condições de superfície muito semelhantes na época. Assim, a atenção dos cientistas mudou para a busca de vida fóssil em Marte. Uma das principais questões a serem abordadas pelas futuras naves espaciais é se Marte já abrigou suas próprias formas de vida e, em caso afirmativo, como essa vida marciana se compara com a do nosso próprio planeta. Missões futuras incluirão o retorno de amostras marcianas selecionadas de rochas sedimentares em locais que já continham água e, portanto, talvez vida antiga. As buscas mais importantes pela vida marciana (passada ou presente) serão assim realizadas em nossos laboratórios aqui na Terra.

EVOLUÇÃO PLANETÁRIA DIVERGENTE

Vênus, Marte e nosso próprio planeta Terra formam uma tríade de mundos notavelmente diversificada. Embora todos os três orbitem aproximadamente na mesma zona interna ao redor do Sol e todos aparentemente tenham começado com a mesma mistura química de silicatos e metais, seus caminhos evolutivos divergiram. Como resultado, Vênus tornou-se quente e seco, Marte tornou-se frio e seco, e apenas a Terra acabou com o que consideramos um clima hospitaleiro.

A Terra já esteve em perigo de um destino semelhante? Ou ainda pode ser levada para um desses caminhos? Uma das razões para estudar Vênus e Marte é buscar insights sobre essa questão.

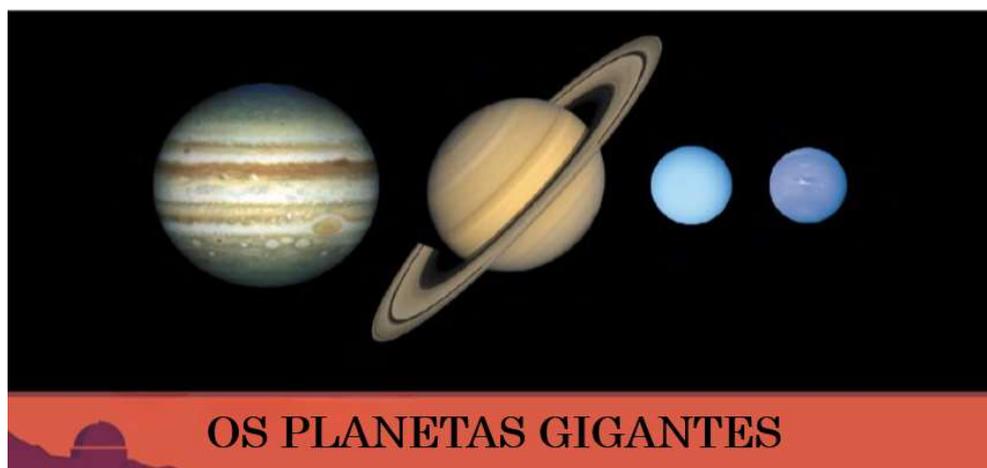
Algumas pessoas até sugeriram que, se entendêssemos melhor a evolução de Marte e Vênus, poderíamos reverter sua evolução e restaurar ambientes mais parecidos com a Terra. Embora pareça improvável que os humanos possam transformar Marte ou Vênus em uma réplica da Terra, considerar essas possibilidades é uma parte útil de nossa busca mais geral para entender o delicado equilíbrio ambiental que distingue nosso planeta de seus dois vizinhos.



UMA INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA

Prof. Dr. Fernando R de Paula
Departamento de Física e Química

Ilha Solteira 2024



11 OS PLANETAS GIGANTES

O que aprendemos sobre a Terra estudando os planetas? Humildade.” —Andrew Ingersoll (professor de ciência planetária no California Institute of Technology) discutindo os resultados da missão Voyager em 1986.

Além de Marte e do cinturão de asteroides, encontramos uma nova região do sistema solar: o reino dos gigantes. As temperaturas aqui são mais baixas, permitindo que a água e outros voláteis condensem como gelo. Os planetas são muito maiores, as distâncias entre eles são muito maiores, e cada mundo gigante é acompanhado por um extenso sistema de luas e anéis.

De muitas perspectivas, o sistema solar externo é onde está a ação, e os planetas gigantes são os membros mais importantes da família do Sol. Quando comparados a esses gigantes externos, os membros do sistema solar feitos rocha e metal que orbitam mais perto do Sol podem parecer insignificantes. Esses quatro mundos gigantes — Júpiter, Saturno, Urano, Netuno — são os assuntos deste capítulo. Seus anéis, luas e o planeta anão Plutão são discutidos em um capítulo posterior.

11.1 EXPLORANDO OUTROS PLANETAS

Os planetas gigantes detêm a maior parte da massa em nosso sistema planetário. Júpiter sozinho excede a massa de todos os outros planetas combinados (Fig. 11.1). O material disponível para construir esses planetas pode ser dividido em três classes de acordo com o que são feitos: “gases”, “gelos” e “rochas” (veja a Tab. 11.1). Os “gases” são principalmente

hidrogênio e hélio, os elementos mais abundantes no universo. Da forma como é usado aqui, o termo “gelos” refere-se compostos que se formam a partir dos elementos mais abundantes: oxigênio, carbono e nitrogênio. Os gelos comuns são água, metano e amônia, mas os gelos também podem incluir monóxido de carbono, dióxido de carbono e outros. As “rochas” são ainda menos abundantes que os gelos e incluem todo o resto: magnésio, silício, ferro e assim por diante.

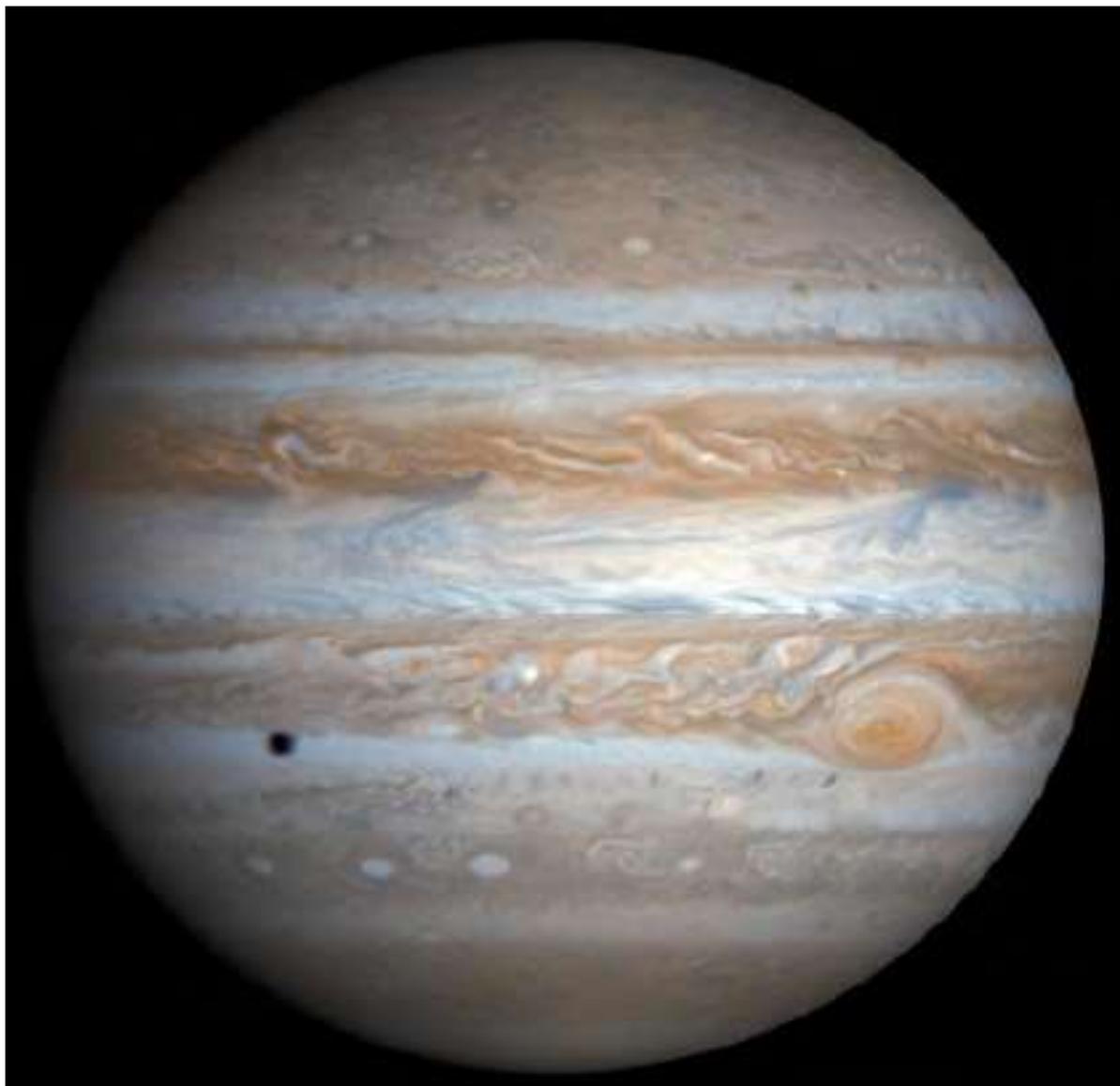


Figura 11.1: Júpiter. A sonda Cassini fotografou Júpiter a caminho de Saturno em 2012. O sistema de tempestade gigante chamado Grande Mancha Vermelha é visível no canto inferior direito. A mancha escura no canto inferior esquerdo é a sombra da lua de Júpiter, Europa.

No sistema solar externo, os gases dominam os dois maiores planetas, Júpiter e Saturno, daí o apelido de “gigantes gasosos”. Urano e Netuno são chamados de “gigantes de gelo” porque seus interiores contêm muito mais do componente “gelo” do que seus primos maiores. A química para todas as quatro atmosferas de planetas gigantes é dominada pelo hidrogênio. Esse hidrogênio fez com que a química do sistema solar externo se tornasse redutora, o que significa que outros elementos tendem a se combinar primeiro com o hidrogênio. No início do sistema solar, a maior parte do oxigênio combinado com hidrogênio para fazer H₂O e, portanto, não estava disponível para formar os tipos de compostos oxidados com outros elementos que são mais familiares para nós no sistema solar interno (como o CO₂). Como resultado, os compostos detectados na atmosfera dos planetas gigantes são principalmente gases à base de hidrogênio, como metano (CH₄) e amônia (NH₃), ou hidrocarbonetos mais complexos (combinações de hidrogênio e carbono), como etano (C₂H₆) e acetileno (C₂H₂).

Tabela 11.1: Abundância no sistema exterior

Material	Nome	Aproximado % (massa)
Gás	H ₂	75
Gás	He	24
Gelo	H ₂ O	0,6
Gelo	CH ₄	0,4
Gelo	NH ₃	0,1
Rocha	Mg, Fe, Si	0,3

EXPLORAÇÃO DO SISTEMA SOLAR EXTERIOR ATÉ O MOMENTO

Oito naves espaciais, sete dos Estados Unidos e uma da Europa, penetraram além do cinturão de asteroides no reino dos gigantes.

Os desafios de explorar tão longe da Terra são consideráveis. Os tempos de voo para os planetas gigantes são medidos em anos a décadas, em vez dos meses necessários para chegar a Vênus ou Marte. Mesmo na velocidade da luz, as mensagens levam horas para passar entre a Terra e a espaçonave. Se um problema se desenvolver perto de Saturno, por exemplo, uma espera de horas para que o alarme chegue à Terra e para que as instruções

sejam encaminhadas de volta à espaçonave pode significar um desastre. As naves espaciais para o sistema solar externo devem, portanto, ser altamente confiáveis e capazes de um maior grau de independência e autonomia. As missões do sistema solar externo também devem carregar suas próprias fontes de energia, já que o Sol está muito longe para fornecer energia suficiente. Aquecedores são necessários para manter os instrumentos em temperaturas operacionais adequadas, e as naves espaciais devem ter transmissores de rádio poderosos o suficiente para enviar seus dados para receptores na Terra.

A primeira espaçonave a investigar as regiões além de Marte foram as Pioneers 10 e 11 da NASA, lançadas em 1972 e 1973 como desbravadoras de Júpiter. Um de seus principais objetivos era simplesmente determinar se uma espaçonave poderia realmente navegar pelo cinturão de asteroides que fica além de Marte sem ser destruída por colisões com poeira de asteroides. Outro objetivo era medir os riscos de radiação na magnetosfera (ou zona de influência magnética) de Júpiter. Ambas as espaçonaves passaram pelo cinturão de asteroides sem incidentes, mas as partículas energéticas no campo magnético de Júpiter quase destruíram os componentes eletrônicos, fornecendo informações necessárias para um projeto seguro de missões subsequentes.

A Pioneer 10 passou por Júpiter em 1973, e após acelerou em direção aos limites do sistema solar. A Pioneer 11 empreendeu um programa mais ambicioso, usando a gravidade de Júpiter para mirar em Saturno, que alcançou em 1979. A espaçonave gêmea Voyager lançou a próxima onda de exploração de planetas exteriores em 1977. As Voyagers 1 e 2 carregavam 11 instrumentos científicos, incluindo câmeras e espectrômetros, bem como dispositivos para medir as características das magnetosferas planetárias. Uma vez que eles continuaram sua viagem após seus encontros planetários, estas são agora as naves espaciais mais distantes já lançadas pela humanidade.

A Voyager 1 chegou a Júpiter em 1979 e usou a gravidade desse planeta para levá-la a Saturno em 1980. A Voyager 2 chegou a Júpiter quatro meses depois, mas seguiu um caminho diferente para visitar todos os planetas exteriores, chegando a Saturno em 1981, Urano em 1986 e Netuno em 1989. Essa trajetória foi possível pelo alinhamento aproximado dos quatro planetas gigantes do mesmo lado do Sol. Cerca de uma vez a cada 175 anos, esses planetas estão em tal posição, e permite que uma única espaçonave visite todos eles usando sobrevoos assistidos pela gravidade para ajustar o curso para cada encontro subsequente; tal manobra foi apelidada de “Grand Tour” pelos astrônomos.

ORBITADORES GALILEU E CASSINI

As missões Pioneer e Voyager realizaram sobrevoos dos planetas gigantes: cada uma delas produziu apenas olhares rápidos antes que a espaçonave avançasse além. Para estudos mais detalhados desses mundos, precisamos de naves espaciais que possam entrar em órbita ao redor de um planeta. Para Júpiter e Saturno, esses orbitadores foram as espaçonaves Galileo e Cassini. Até o momento, nenhuma missão orbital para Urano e Netuno se iniciou, embora os cientistas planetários tenham manifestado grande interesse. A espaçonave Galileo foi lançada em direção a Júpiter em 1989 e chegou em 1995. A Galileo iniciou suas investigações implantando uma sonda de entrada em Júpiter, para os primeiros estudos diretos das camadas atmosféricas externas do planeta.

A sonda mergulhou em um ângulo raso na atmosfera de Júpiter, viajando a uma velocidade de 50 quilômetros por segundo. Esta foi a maior velocidade em que qualquer sonda entrou na atmosfera de um planeta até agora. A alta velocidade de entrada foi resultado da aceleração pela forte atração gravitacional de Júpiter.

O atrito atmosférico diminuiu a velocidade da sonda, produzindo temperaturas na frente de seu escudo térmico de até 15.000 °C. À medida que a velocidade da sonda caiu para 2.500 quilômetros por hora, os restos do escudo de calor brilhante foram descartados e um paraquedas permitiu que a espaçonave com seus instrumentos penetrasse mais suavemente na atmosfera (Fig. 11.2). Os dados dos instrumentos da sonda foram retransmitidos para a Terra através da principal espaçonave Galileo.

A sonda continuou a operar por uma hora, descendo 200 quilômetros na atmosfera. Alguns minutos depois, o paraquedas de poliéster derreteu e, em poucas horas, a estrutura principal de alumínio e titânio da sonda vaporizou para se tornar parte do próprio Júpiter. Cerca de 2 horas após o recebimento dos dados finais da sonda, a espaçonave principal disparou seus retrofoguetes para que pudesse ser capturado em órbita ao redor do planeta, onde seus principais objetivos eram estudar as grandes e muitas vezes intrigantes luas de Júpiter.



Figura 11.2: Sonda Galileo caindo em Júpiter. A representação deste artista mostra a sonda Galileo descendo via paraquedas logo após a separação do escudo térmico protetor. A sonda fez suas medições da atmosfera de Júpiter em 7 de dezembro de 1995.

A missão da Cassini a Saturno (Fig. 11.3), um empreendimento cooperativo entre a NASA e a Agência Espacial Europeia, foi semelhante a Galileo em sua abordagem dupla. Lançada em 1997, a Cassini chegou em 2004 e entrou em órbita ao redor de Saturno, iniciando extensos estudos de seus anéis e luas, bem como do próprio planeta. Em janeiro de 2005, a Cassini lançou uma sonda de entrada na atmosfera da grande lua de Saturno, Titã, onde pousou com sucesso na superfície.



Figura 11.4: Terra vista de Saturno. Esta imagem popular da Cassini mostra a Terra como um pequeno ponto (marcado com uma seta) visto abaixo dos anéis de Saturno. Foi tirada em julho de 2013, quando Saturno estava a 1,4 bilhão de quilômetros da Terra.

11.2 OS PLANETAS GIGANTES

Vamos agora examinar os quatro planetas gigantes (ou jovianos) com mais detalhes. Nossa abordagem não é apenas catalogar suas características, mas compará-los um com os outros, observando suas semelhanças e diferenças e tentando relacionar suas propriedades com suas diferentes massas e distâncias do Sol.

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS

Os planetas gigantes estão muito longe do Sol. Júpiter está mais de cinco vezes mais distante do Sol do que a distância da Terra (5 UA), e leva pouco menos de 12 anos para dar a volta em torno do Sol. Saturno está cerca de duas vezes mais distante que Júpiter (quase 10 UA) e leva quase 30 anos para completar uma órbita. Urano orbita a 19 UA com um período de 84 anos, enquanto Netuno, a 30 UA, requer 165 anos. Essas longas escalas de tempo tornam difícil para nós, humanos de vida curta, estudar as mudanças sazonais nos planetas externos.

Júpiter e Saturno têm muitas semelhanças em composição e estrutura interna, embora Júpiter seja quase quatro vezes mais massivo. Urano e Netuno são menores e diferem em composição e estrutura interna de seus irmãos maiores. Algumas das principais propriedades desses quatro planetas estão resumidas na Tab. 11.3.

Júpiter, o gigante entre os gigantes, tem massa suficiente para formar 318 Terras. Seu diâmetro é cerca de 11 vezes o da Terra (e cerca de um décimo do Sol). A densidade média de Júpiter é de $1,3 \text{ g/cm}^3$, muito menor do que a de qualquer um dos planetas terrestres. O material de Júpiter está espalhado por um volume tão grande que mais de 1.400 Terras caberiam nele.

A massa de Saturno é 95 vezes a da Terra e sua densidade média é de apenas $0,7 \text{ g/cm}^3$ – a menor de qualquer planeta. Como isso é menor que a densidade da água, Saturno seria leve o suficiente para flutuar.

Urano e Netuno têm uma massa cerca de 15 vezes maior que a da Terra e, portanto, são apenas 5% da massa de Júpiter. Suas densidades de $1,3 \text{ g/cm}^3$ e $1,6 \text{ g/cm}^3$, respectivamente, são muito maiores que as de Saturno. Esta é uma evidência que nos diz que sua composição deve diferir fundamentalmente dos gigantes gasosos. Quando os astrônomos começaram a descobrir outros sistemas planetários (exoplanetas), descobrimos que planetas do tamanho de Urano e Netuno são comuns, e que existem ainda mais exoplanetas de tamanho intermediário entre a Terra e esses gigantes de gelo, um tipo de planeta não encontrado em nosso sistema solar.

Tabela 11.3: Propriedades dos Planetas jovianos

Planeta	Distância (UA)	Período (anos)	Diâmetro (km)	Massa (Terra = 1)	Densidade (g/cm^3)	Rotação (horas)
Júpiter	5,2	11,9	142.800	318	1,3	9,9
Saturno	9,5	29,5	120.540	95	0,7	10,7
Urano	19,2	84,1	51.200	14	1,3	17,2
Netuno	30,0	164,8	49.500	17	1,6	16,1

COMPOSIÇÃO E ESTRUTURA

Embora não possamos ver esses planetas, os astrônomos estão confiantes de que os interiores de Júpiter e Saturno são compostos principalmente de hidrogênio e hélio. É claro que esses gases foram medidos apenas em sua atmosfera, mas cálculos realizados pela primeira vez há mais de 50 anos mostraram que esses dois gases leves são os únicos materiais possíveis dos quais um planeta com as massas e densidades observadas de Júpiter e Saturno poderia ser construído.

As estruturas internas desses dois planetas são difíceis de prever. Isso ocorre principalmente porque esses planetas são tão grandes que o hidrogênio e o hélio em seus centros ficam tremendamente comprimidos e se comportam de maneiras que esses gases nunca podem se comportar na Terra. Os melhores modelos teóricos que temos da estrutura de Júpiter preveem uma pressão central superior a 100 milhões de bar e uma densidade central de cerca de 31 g/cm^3 . (Em contraste, o núcleo da Terra tem uma pressão central de 4 milhões de bar e uma densidade central de 17 g/cm^3).

Nas pressões dentro dos planetas gigantes, materiais familiares podem assumir formas estranhas. Alguns milhares de quilômetros abaixo das nuvens visíveis de Júpiter e Saturno, as pressões se tornam tão grandes que o hidrogênio muda do estado gasoso para o líquido. Ainda mais fundo, esse hidrogênio líquido é ainda mais comprimido e começa a agir como um metal. Em Júpiter, a maior parte do interior é hidrogênio metálico líquido. Como Saturno é menos massivo, possui apenas um pequeno volume de hidrogênio metálico, mas a maior parte de seu interior é líquido. Urano e Netuno são muito pequenos para atingir pressões internas suficientes para liquefazer o hidrogênio. Voltaremos à discussão das camadas metálicas de hidrogênio quando examinarmos os campos magnéticos dos planetas gigantes.

Cada um desses planetas tem um núcleo composto por materiais mais pesados, como demonstrado por análises detalhadas de seus campos gravitacionais. Presumivelmente, esses núcleos são os corpos originais de rocha e gelo que se formaram antes da captura de gás da nebulosa circundante. Os núcleos exibem uma pressão de dezenas de milhões de bar. Enquanto os cientistas falam que os núcleos dos planetas gigantes são compostos de rocha e gelo, podemos ter certeza de que nem rocha nem gelo assumem formas familiares a tais pressões e temperaturas. Lembre-se de que o que realmente se entende por “rocha” é qualquer material composto principalmente de ferro, silício e oxigênio, enquanto o termo

“gelo” neste capítulo denota materiais compostos principalmente pelos elementos carbono, nitrogênio e oxigênio em combinação com hidrogênio.

A Fig. 11.5 ilustra as prováveis estruturas interiores dos quatro planetas jovianos. Parece que todos os quatro têm núcleos semelhantes de rocha e gelo. Em Júpiter e Saturno, os núcleos constituem apenas uma pequena porcentagem da massa total, consistente com a composição inicial das matérias-primas mostradas na Tab. 11.1. No entanto, a maior parte da massa de Urano e Netuno reside nesses núcleos, demonstrando que os dois planetas externos foram incapazes de atrair grandes quantidades de hidrogênio e hélio quando se formaram pela primeira vez.

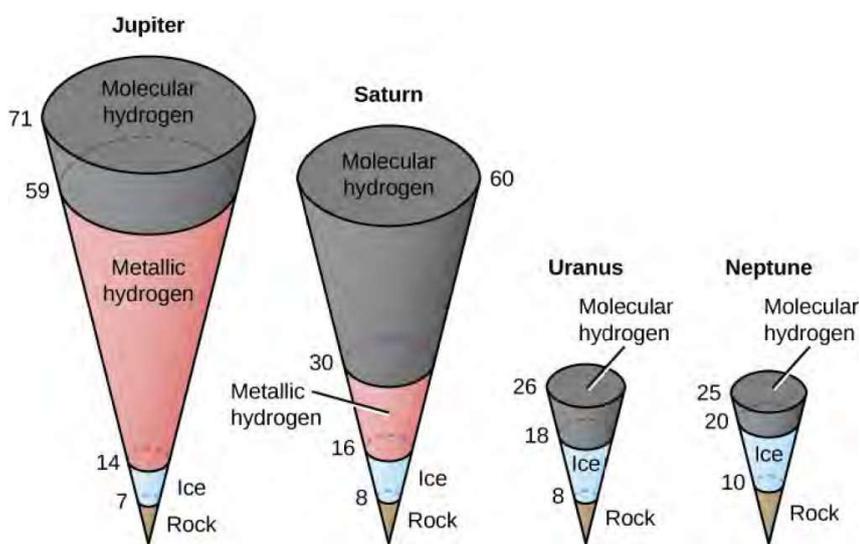


Figura 11.5: Estruturas Internas dos Planetas Jovianos. Júpiter e Saturno são compostos principalmente de hidrogênio e hélio (mas o hidrogênio domina), mas Urano e Netuno consistem em grande parte de compostos de carbono, nitrogênio e oxigênio. (Os diagramas são desenhados em escala; os números mostram raios em milhares de quilômetros).

CAMPO MAGNÉTICO

Cada um dos planetas gigantes tem um forte campo magnético, gerado por correntes elétricas em seu interior girando rapidamente. Associadas aos campos magnéticos estão as magnetosferas dos planetas, que são regiões ao redor do planeta dentro das quais o próprio campo magnético do planeta domina sobre o campo magnético interplanetário geral. As magnetosferas desses planetas são suas maiores características, estendendo-se por milhões de quilômetros no espaço.

No final da década de 1950, os astrônomos descobriram que Júpiter era uma fonte de ondas de rádio que se tornavam mais intensas em comprimentos de onda mais longos do que em

comprimentos de onda mais curtos – exatamente o inverso do que se espera da radiação térmica (radiação causada pelas vibrações normais das partículas dentro de toda a matéria). Tal comportamento é típico, entretanto, da radiação emitida quando elétrons são acelerados por um campo magnético. Chamamos isso de radiação síncrotron porque foi observada pela primeira vez na Terra em aceleradores de partículas, chamados síncrotrons. Esta foi a nossa primeira dica de que Júpiter deve ter um forte campo magnético.

Observações posteriores mostraram que as ondas de rádio vêm de uma região ao redor de Júpiter com um diâmetro várias vezes maior que o do próprio planeta (Fig. 11.6). As evidências sugeriam que um grande número de partículas atômicas carregadas deve estar circulando em torno de Júpiter, espiralando em torno das linhas de força de um campo magnético associado ao planeta. Isso é exatamente o que observamos acontecendo, mas em menor escala, no cinturão de Van Allen ao redor da Terra. Os campos magnéticos de Saturno, Urano e Netuno não são tão fortes, mas funcionam de maneira semelhante.

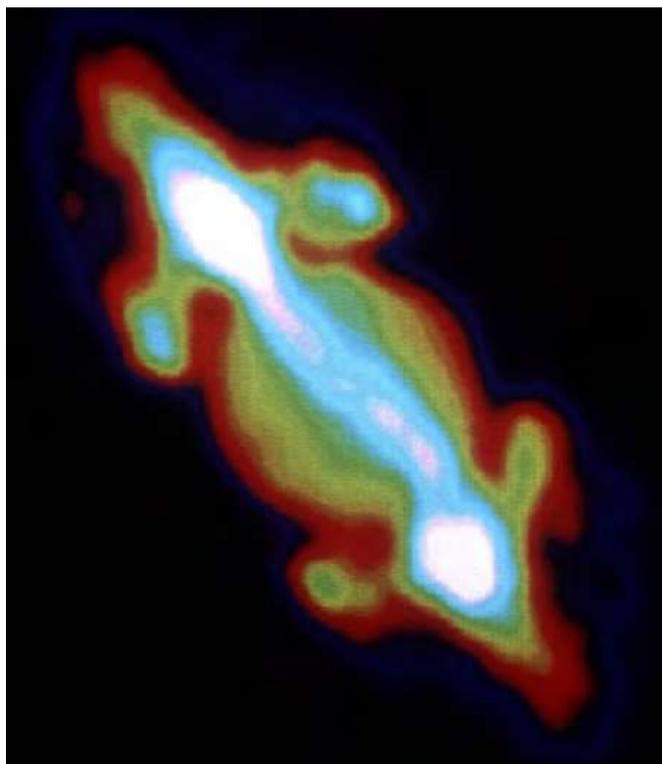


Figura 11.6: Júpiter em ondas de rádio. Esta imagem de cores falsas de Júpiter foi feita com o Very Large Array (de radiotelescópios) no Novo México. Vemos parte da magnetosfera, mais brilhante no meio porque o maior número de partículas carregadas está na zona equatorial de Júpiter. O planeta em si é um pouco menor que o oval verde no centro. Cores diferentes são usadas para indicar diferentes intensidades de radiação síncrotron.

Dentro de cada magnetosfera, partículas carregadas espiralam no campo magnético; como resultado, eles podem ser acelerados para altas energias. Essas partículas carregadas podem vir do Sol ou da vizinhança do próprio planeta. No caso de Júpiter, Io, uma de suas luas, acaba tendo erupções vulcânicas que lançam partículas carregadas no espaço e diretamente na magnetosfera joviana.

O eixo do campo magnético de Júpiter (a linha que liga o pólo norte magnético ao pólo sul magnético) não está alinhado exatamente com o eixo de rotação do planeta; em vez disso, ele é inclinado em cerca de 10°. Urano e Netuno têm inclinações magnéticas ainda maiores, de 60° e 55°, respectivamente. O campo de Saturno, por outro lado, está perfeitamente alinhado com seu eixo de rotação. Por que planetas diferentes têm inclinações magnéticas tão diferentes não é bem compreendido.

Os processos físicos em torno dos planetas jovianos acabam sendo versões mais suaves do que os astrônomos encontram em muitos objetos distantes, desde os restos de estrelas mortas até as intrigantes usinas distantes que chamamos de quasares. Uma razão para estudar as magnetosferas dos planetas gigantes e da Terra é que eles fornecem análogos acessíveis próximos de processos cósmicos mais energéticos e desafiadores.

COMPOSIÇÃO ATMOSFÉRICA

Quando a luz do sol reflete nas atmosferas dos planetas gigantes, os gases atmosféricos deixam suas “impressões digitais” no espectro da luz. As observações espectroscópicas dos planetas jovianos começaram no século XIX, mas por muito tempo os astrônomos não foram capazes de interpretar os espectros observados. Até a década de 1930, as características mais proeminentes fotografadas nesses espectros permaneciam não identificadas. Em seguida, melhores espectros revelaram a presença de moléculas de metano (CH₄) e amônia (NH₃) nas atmosferas de Júpiter e Saturno.

No início, os astrônomos acreditavam que o metano e a amônia poderiam ser os principais constituintes dessas atmosferas, mas agora sabemos que o hidrogênio e o hélio são na verdade os gases dominantes. A confusão surgiu porque nem o hidrogênio nem o hélio possuem características espectrais facilmente detectadas no espectro visível. Não foi até que a sonda Voyager mediu os espectros de infravermelho distante de Júpiter e Saturno e encontrou a presença do hidrogênio e hélio.

As composições das duas atmosferas são geralmente semelhantes, exceto que em Saturno há menos hélio como resultado da precipitação de hélio que contribui para a fonte de

energia interna de Saturno. As medições mais precisas da composição foram feitas em Júpiter pela sonda de entrada Galileu em 1995; como resultado, conhecemos a abundância de alguns elementos na atmosfera joviana ainda melhor do que conhecemos as do Sol.

NÚVENS E ESTRUTURA ATMOSFÉRICA

As nuvens de Júpiter (Fig. 11.7) estão entre as vistas mais espetaculares do sistema solar. Elas variam em cores do branco ao laranja ao vermelho ao marrom, girando e torcendo em um caleidoscópio de padrões em constante mudança. Saturno mostra atividade de nuvens semelhante, mas muito mais moderada; em vez de cores vivas, suas nuvens têm um tom caramelo quase uniforme (Figura 11.8).



Figura 11.7: Nuvens Coloridas de Júpiter. As cores vibrantes das nuvens em Júpiter apresentam um enigma para os astrônomos: dadas as temperaturas frias e a composição de quase 90% de hidrogênio, a atmosfera deveria ser incolor. Uma hipótese sugere que talvez compostos coloridos de hidrogênio surjam de áreas quentes. As cores reais são um pouco mais suaves, como mostrado na Figura 11.1.

Diferentes gases congelam a diferentes temperaturas. Nas temperaturas e pressões das atmosferas superiores de Júpiter e Saturno, o metano permanece um gás, mas a amônia pode condensar e congelar. (Da mesma forma, o vapor de água se condensa na alta atmosfera da Terra para produzir nuvens de cristais de gelo.) As nuvens primárias que vemos ao redor desses planetas, seja de uma espaçonave ou de um telescópio, são compostas de cristais de amônia congelados. As nuvens de amônia marcam a borda superior das troposferas dos planetas; acima disso está a estratosfera, a parte mais fria da atmosfera.

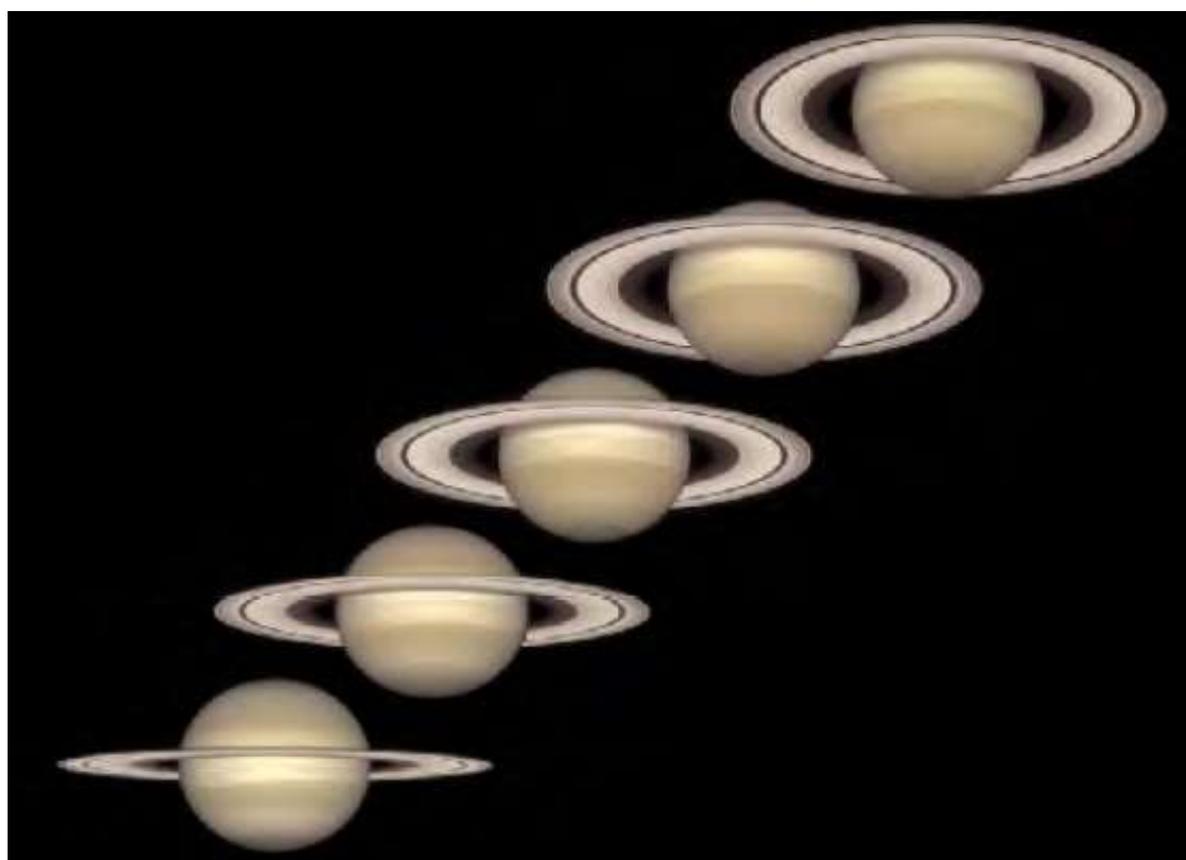


Figura 11.8: Saturno ao longo de cinco anos. Essas belas imagens de Saturno foram registradas pelo Telescópio Espacial Hubble entre 1996 e 2000. Como Saturno está inclinado em 27° , vemos a orientação dos anéis de Saturno ao redor de seu equador mudar à medida que o planeta se move ao longo de sua órbita. Observe as bandas horizontais na atmosfera.

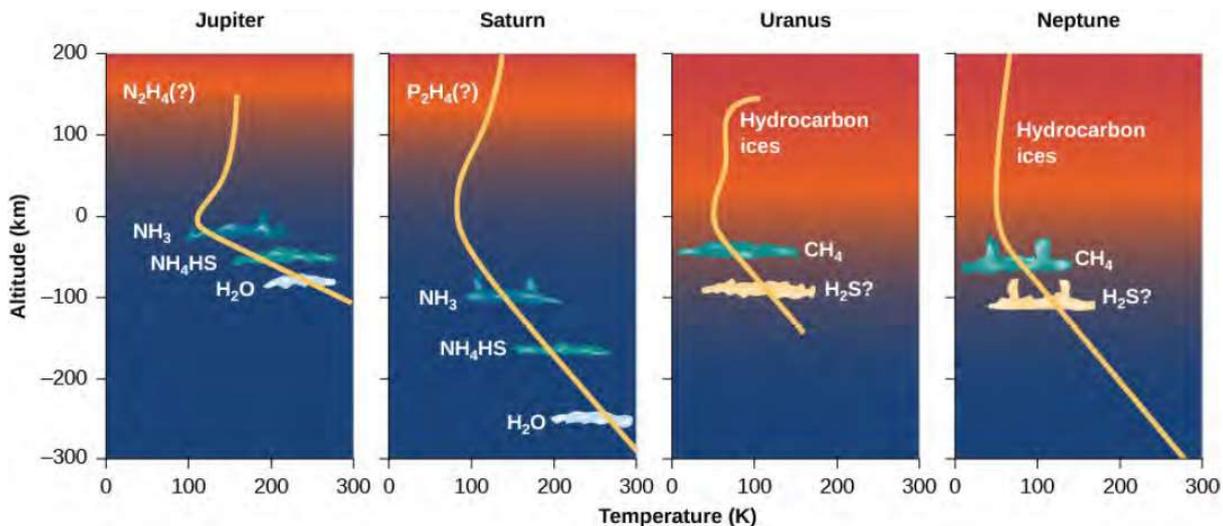


Figura 11.9: Estrutura Atmosférica dos Planetas Jovianos. Em cada diagrama, a linha amarela mostra como a temperatura (veja a escala na parte inferior) muda com a altitude (veja a escala à esquerda). A localização das camadas principais em cada planeta também é mostrada.

Os diagramas na Fig. 11.9 mostram a estrutura e as nuvens nas atmosferas de todos os quatro planetas jovianos. Tanto em Júpiter quanto em Saturno, a temperatura perto do topo das nuvens é de cerca de 140 K (apenas um pouco mais fria do que as calotas polares de Marte). Em Júpiter, este nível de nuvens está a uma pressão de cerca de 0,1 bar (um décimo da pressão atmosférica na superfície da Terra), mas em Saturno ocorre mais abaixo na atmosfera, a cerca de 1 bar. Como as nuvens de amônia ficam muito mais profundas em Saturno, elas são mais difíceis de ver, e a aparência geral do planeta é muito mais suave do que a aparência de Júpiter.

Dentro das troposferas desses planetas, a temperatura e a pressão aumentam com a profundidade.

Acima das nuvens de amônia visíveis na atmosfera de Júpiter, encontramos a estratosfera, que atinge uma temperatura mínima próxima a 120 K. Em altitudes ainda mais altas, as temperaturas voltam a subir, assim como na atmosfera superior da Terra, porque nestas altitudes as moléculas absorvem ultravioleta luz do Sol. As cores das nuvens são devidas a impurezas, produto de reações químicas entre os gases atmosféricos em um processo que chamamos de fotoquímica. Na atmosfera superior de Júpiter, as reações fotoquímicas criam uma variedade de compostos bastante complexos de hidrogênio e carbono que formam uma fina camada de smog (nevoeiro) muito acima das nuvens visíveis. Mostramos esse smog como uma região laranja difusa na Fig. 11.9; no entanto, essa fina camada não bloqueia nossa visão das nuvens abaixo dela.

A atmosfera visível de Saturno é composta de aproximadamente 75% de hidrogênio e 25% de hélio, com traços de metano, etano, propano e outros hidrocarbonetos. A estrutura geral é semelhante à de Júpiter. As temperaturas são um pouco mais frias, no entanto, a atmosfera é mais estendida devido à menor gravidade da superfície de Saturno. Assim, as camadas são esticadas por uma distância maior, como você pode ver na Fig. 11.9. No geral, porém, as mesmas regiões atmosféricas, nuvens de condensação e reações fotoquímicas que vemos em Júpiter devem estar presentes em Saturno (Fig. 11.10).

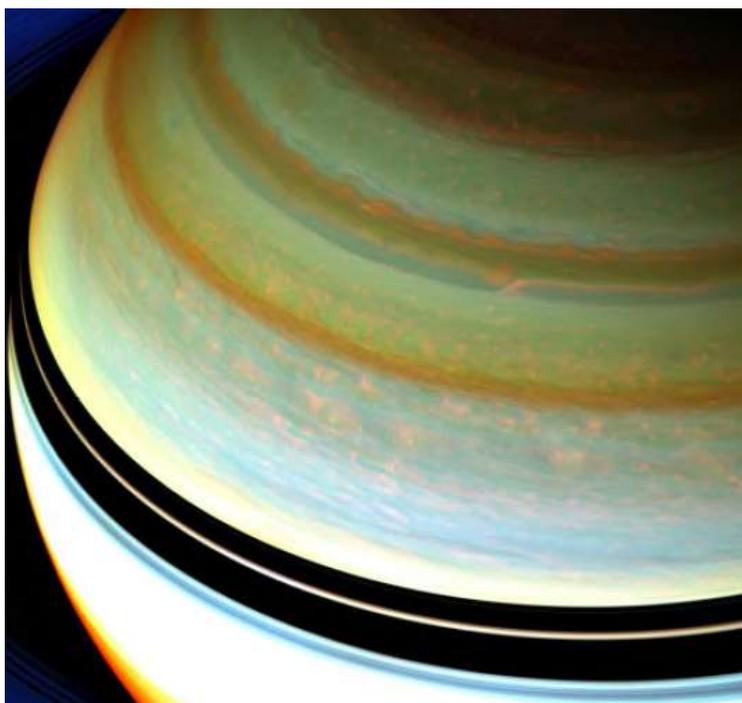


Figura 11.10: Estrutura da Nuvem em Saturno. Nesta imagem da Cassini, as cores foram intensificadas, para que possamos ver as faixas e zonas e tempestades na atmosfera. A faixa escura é a sombra dos anéis do planeta.

Saturno tem uma estrutura de nuvens anômala que tem confundido os cientistas: um padrão hexagonal ao redor do pólo norte, mostrado na Figura 11.11. Cada um dos seis lados do hexágono é mais longo que o diâmetro da Terra. Os ventos também são extremamente velozes em Saturno, com velocidades de até 1.800 quilômetros por hora medidos perto do equador.

Ao contrário de Júpiter e Saturno, Urano é quase totalmente incolor visto em comprimentos de onda que variam do ultravioleta ao infravermelho (veja sua imagem na Figura 11.12). Os cálculos indicam que a estrutura atmosférica básica de Urano deve se assemelhar à de Júpiter e Saturno, embora suas nuvens superiores (no nível de pressão de 1 bar) sejam compostas de metano em vez de amônia. No entanto, a ausência de uma

fonte de calor interna suprime o movimento para cima e para baixo (movimentos de convecção) e leva a uma atmosfera muito estável com pouca estrutura visível.

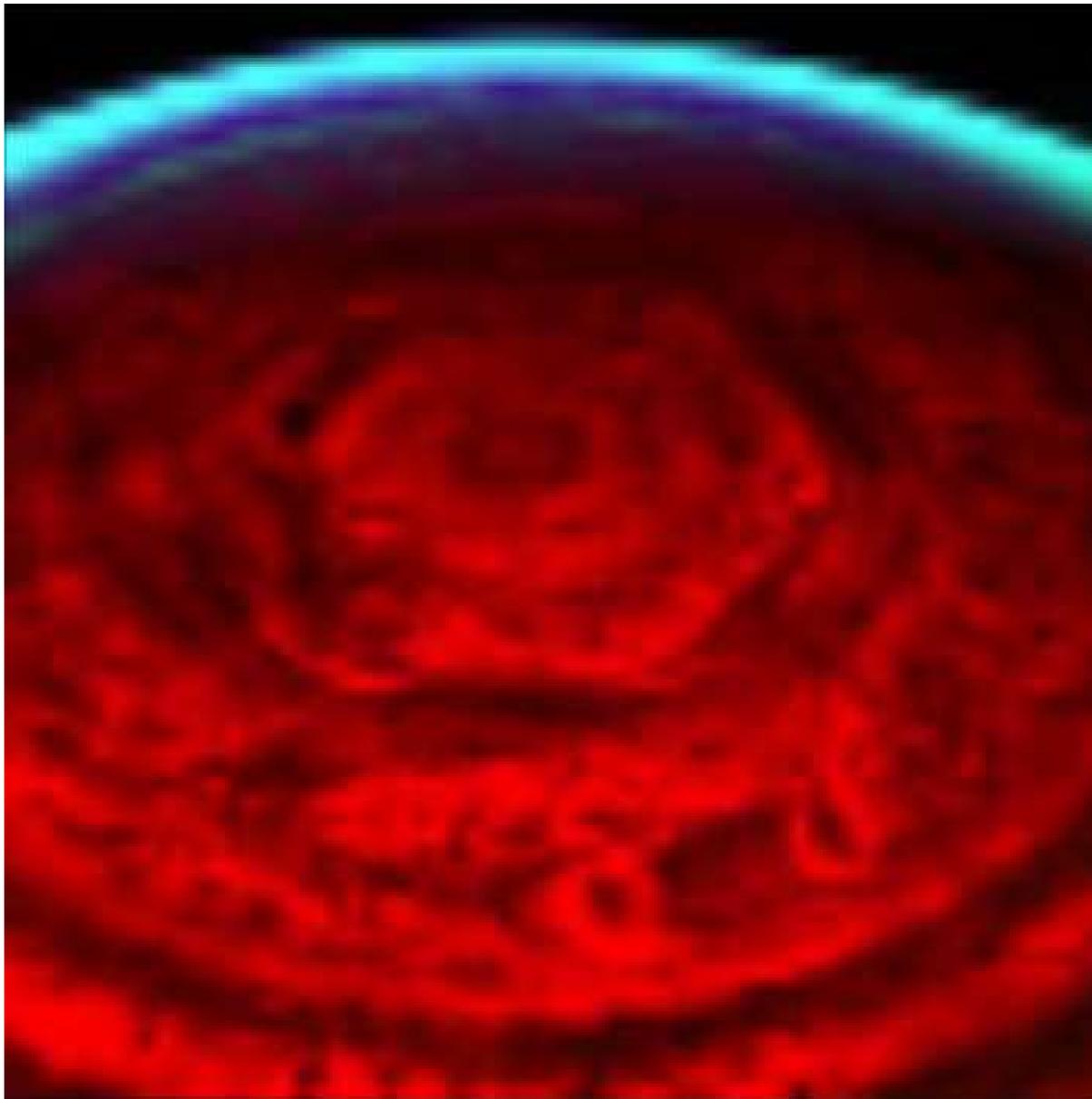


Figura 11.11: Padrão Hexagonal no Pólo Norte de Saturno. Nesta imagem noturna infravermelha da missão Cassini, o caminho da corrente de jato hexagonal de Saturno é visível quando o pólo norte do planeta emerge da escuridão do inverno.

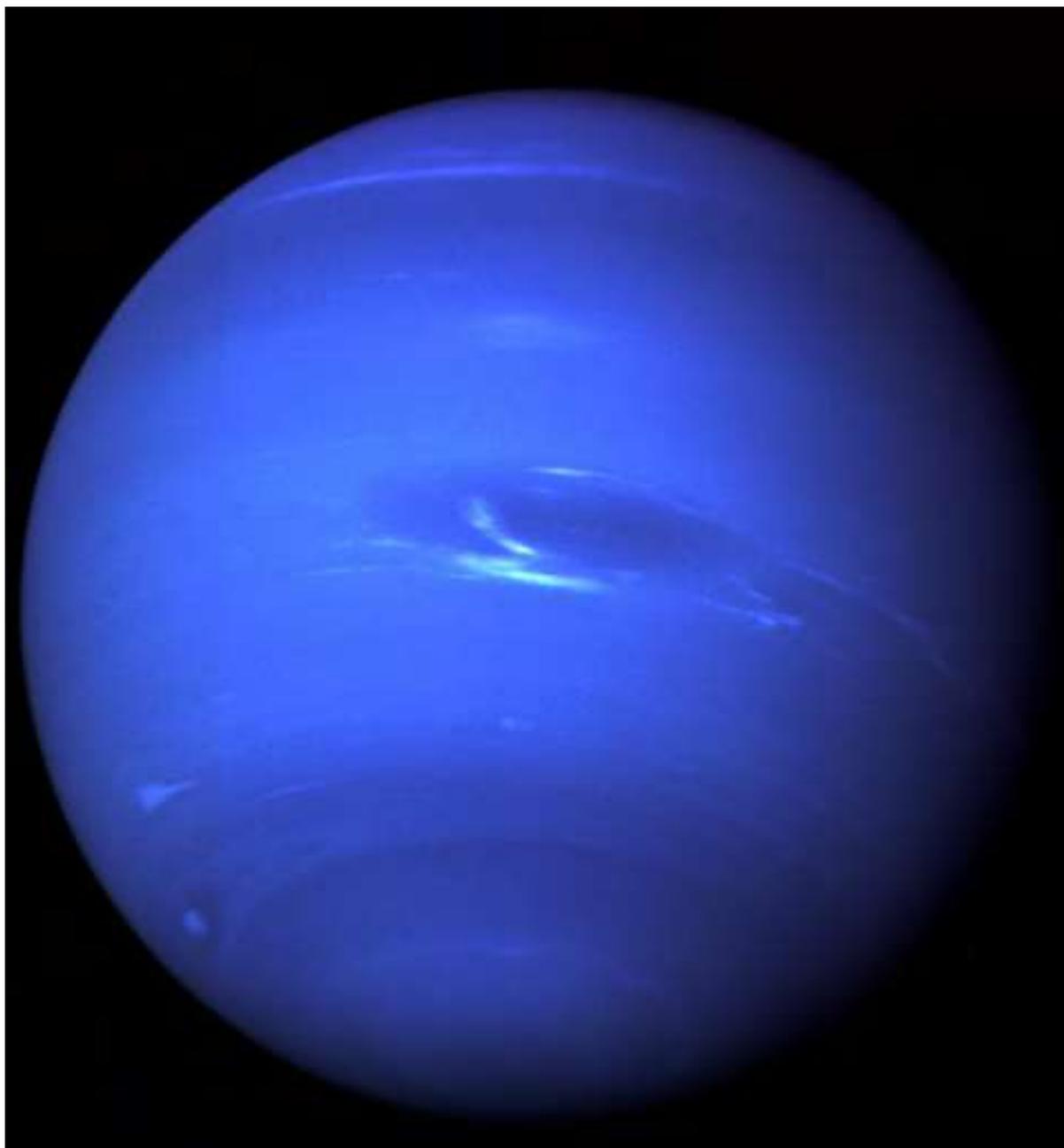


Figura 11.12: Netuno. O planeta Netuno é visto aqui fotografado pela Voyager em 1989. A cor azul, exagerada com processamento computacional, é causada pela dispersão da luz solar na atmosfera superior do planeta.

Ao contrário de Urano, Netuno tem uma atmosfera na qual correntes de convecção – correntes verticais de gás – emanam do interior, alimentadas pela fonte de calor interna do planeta. Essas correntes transportam gás quente acima do nível de nuvem de 1,5 bar, formando nuvens adicionais em altitudes cerca de 75 quilômetros mais altas. Essas nuvens de alta altitude formam padrões brancos brilhantes contra o planeta azul abaixo. A Voyager fotografou sombras distintas no topo das nuvens de metano, permitindo calcular

as altitudes das nuvens altas. A Fig. 11.13 é um close notável das camadas externas de Netuno que nunca poderiam ter sido obtidas da Terra.

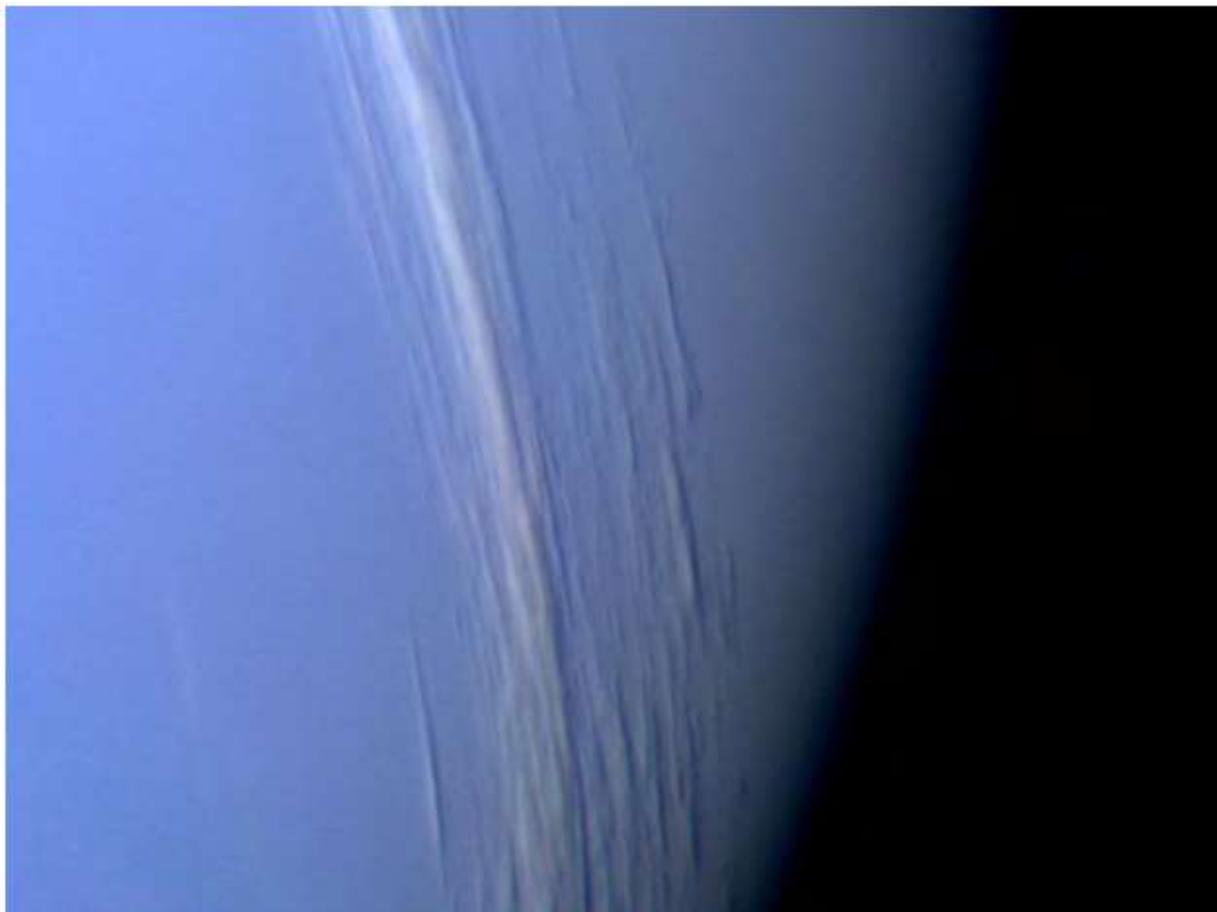


Figura 11.16: Nuvens altas na atmosfera de Netuno. Essas nuvens cirrus (nuvens filiformes) brilhantes e estreitas são feitas de cristais de gelo de metano. Pelas sombras que eles projetam na camada de nuvens mais espessa abaixo, podemos medir que eles são cerca de 75 quilômetros mais altos que as nuvens principais



12 ANEIS, LUAS E PLUTÃO

“Nossa imaginação sempre falha em antecipar a beleza que encontramos na natureza.” — Geólogo Laurence Soderblom, discutindo o encontro da Voyager em 1989 com as luas de Netuno.

Todos os quatro planetas gigantes são acompanhados por luas que orbitam em torno deles como planetas em um sistema solar em miniatura.

Mais de 200 luas são conhecidas no sistema solar externo. Também descobrimos uma fascinante variedade de anéis ao redor de cada um dos planetas jovianos.

Antes das missões Voyager, mesmo a maior das luas do planeta exterior eram meros pontos de luz em nossos telescópios. Então, em menos de uma década, tivemos imagens em close-up, e essas luas se tornaram mundos individuais para nós, cada um com características e peculiaridades únicas. A missão Galileo acrescentou muito ao nosso conhecimento das luas de Júpiter, e a missão Cassini fez o mesmo para o sistema de Saturno. Em 2015, a espaçonave New Horizons da NASA completou a exploração inicial dos planetas “clássicos” no sistema solar com seu sobrevoo de Plutão e suas luas. Incluímos Plutão aqui porque, de certa forma, ele se assemelha a algumas das luas maiores do sistema solar externo. Cada nova missão da espaçonave revelou muitas surpresas, pois os objetos no sistema solar externo são muito mais variados e geologicamente ativos do que os cientistas haviam previsto.

12.1 SISTEMAS DE ANEIS E LUA

Os anéis e luas (veja as luas na Fig. 12.1) do sistema solar externo não são compostos dos mesmos materiais que os objetos rochosos do sistema solar interno. Deveríamos esperar isso, uma vez que eles se formaram em regiões de temperatura mais baixa, frias o suficiente para que grandes quantidades de gelo de água estivessem disponíveis como materiais de construção. A maioria desses objetos também contém compostos orgânicos escuros misturados com gelo e rocha. Não se surpreenda, portanto, ao descobrir que muitos objetos nos sistemas de anéis e luas são gelados e escuros.

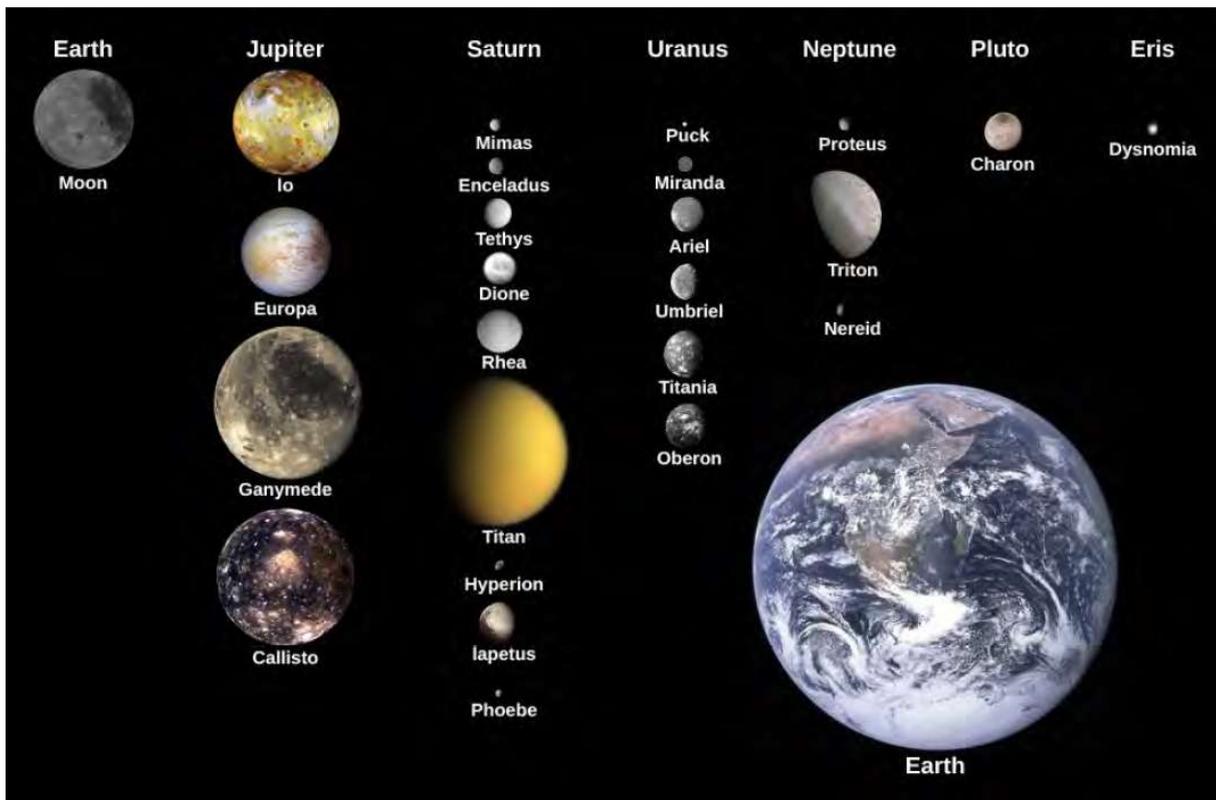


Figura 12.1: Luas do Sistema Solar. Esta imagem mostra algumas luas selecionadas do nosso sistema solar e sua comparação com o tamanho da Lua da Terra e da própria Terra.

Aproximadamente um terço das luas no sistema solar exterior estão em órbitas diretas ou regulares; isto é, eles giram em torno de seu planeta pai na direção oeste-leste e no plano do equador do planeta. A maioria são luas irregulares que orbitam em direção retrógrada (leste-oeste) ou então possuem órbitas de alta excentricidade (mais elípticas que circulares) ou de alta inclinação (entrando e saindo do plano equatorial do planeta). Essas luas irregulares estão localizadas em sua maioria relativamente longe de seu planeta; eles

provavelmente foram formados em outro lugar e posteriormente capturadas pelo planeta que agora orbitam.

O SISTEMA DE JÚPITER

Júpiter tem 96 luas conhecidas e um anel tênue. Estas incluem quatro grandes luas – Calisto, Ganimedes, Europa e Io (veja a Fig. 12.1) – descobertas em 1610 por Galileu e, portanto, muitas vezes chamadas de luas galileanas. Os menores deles, Europa e Io, são aproximadamente do tamanho da nossa Lua, enquanto os maiores, Ganimedes e Calisto, são aproximadamente do mesmo tamanho do planeta Mercúrio. A maioria das luas de Júpiter são muito menores. A maioria está em órbitas retrógradas a mais de 20 milhões de quilômetros de Júpiter; estes são muito provavelmente pequenos asteroides capturados.



Figura 12.2: Luas de Júpiter: Io, Europa, Ganymede e Callisto, respectivamente.

Europa e Io, as duas luas galileanas internas, não são mundos gelados como a maioria das luas dos planetas externos. Com densidades e tamanhos semelhantes à nossa Lua, parecem ser objetos predominantemente rochosos. Como eles não conseguiram adquirir a maior parte do gelo que deve ter sido abundante no sistema solar externo no momento de sua formação?

A causa mais provável é o próprio Júpiter, que era quente o suficiente para irradiar uma grande quantidade de energia infravermelha durante os primeiros milhões de anos após sua formação. Essa radiação infravermelha teria aquecido o disco de material próximo ao planeta que eventualmente se fundiria nas luas mais próximas. Assim, qualquer gelo perto

de Júpiter foi vaporizado, deixando Europa e Io com composições semelhantes aos planetas do sistema solar interno.

Quando olhamos para fotos de Europa em close-up, vemos uma superfície estranha e complicada (Fig. 12.3). Na maior parte, a crosta gelada é extremamente lisa, mas é atravessada por rachaduras e cristas baixas que geralmente se estendem por milhares de quilômetros.



Figura 12.3: Evidência de um oceano na Europa. (a) Um close-up de uma área chamada Conamara Chaos é mostrado aqui com cores realçadas. Esta vista tem 70 quilômetros de largura em sua longa dimensão. Parece que Conamara é uma região onde a crosta gelada de Europa é (ou recentemente era) relativamente fina e há acesso mais fácil ao possível oceano líquido ou lamacento abaixo. Não ancorados à crosta sólida por baixo, muitos dos blocos de gelo aqui parecem ter deslizado ou girado de suas posições originais. Na verdade, as formações vistas aqui são semelhantes às vistas de gelo marinho flutuante e icebergs no Oceano Ártico da Terra. (b) Nesta visão de alta resolução, o gelo é enrugado e atravessado por longas cristas. Onde essas cristas se cruzam, podemos ver quais são mais velhas e quais são mais novas; os mais novos passam por cima dos mais velhos.

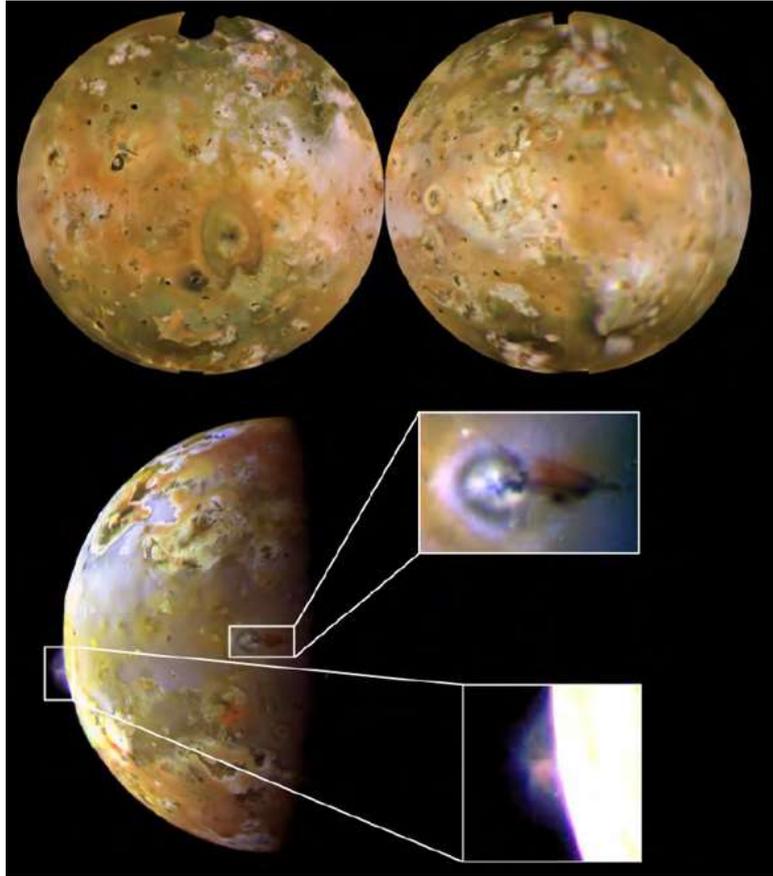


Figura 12.4: Dois lados de Io. Esta imagem composta mostra ambos os lados da lua vulcanicamente ativa Io. Os depósitos alaranjados são neve sulfurosa; o branco é dióxido de enxofre. (Carl Sagan uma vez brincou que Io parece precisar desesperadamente de uma dose de penicilina). Abaixo vulcões em erupções, imagem composta obtidas pela espaçonave Galileo da NASA.

Io, a mais interna das luas galileanas de Júpiter, é em muitos aspectos parecida com nossa Lua, com quase o mesmo tamanho e densidade. Podemos, portanto, esperar que ele tenha experimentado uma história semelhante. Sua aparência, fotografada do espaço, nos conta outra história, no entanto (Fig. 12.4). Em vez de ser um mundo de crateras mortas, Io acaba tendo o mais alto nível de vulcanismo no sistema solar, superando em muito o da Terra.

O SISTEMA DE SATURNO

Saturno tem pelo menos 145 luas conhecidas (veja algumas Fig. 12.5), além de um magnífico conjunto de anéis. A maior das luas, Titã, é quase tão grande quanto Ganimedes no sistema de Júpiter, e é a única lua com uma atmosfera substancial e lagos ou mares de hidrocarbonetos líquidos (como metano e etano) na superfície. Saturno tem outras seis

grandes luas com diâmetros entre 400 e 1600 quilômetros, uma coleção de pequenas luas orbitando dentro ou perto dos anéis, e muitas capturados semelhantes aos de Júpiter. Misteriosamente, uma das luas menores de Saturno, Enceladus, tem gêiseres ativos de água sendo expelidos para o espaço.



Figura 12.5: Algumas das luas de Saturno

Os anéis de Saturno (Fig. 12.6), uma das visões mais impressionantes do sistema solar, são largos e planos, com algumas lacunas maiores e muitas menores. Eles não são sólidos, mas sim uma enorme coleção de fragmentos de gelo, todos orbitando o equador de Saturno em um padrão de tráfego que faz a hora do rush em uma cidade grande parecer simples em comparação. As partículas de anel individuais são compostas principalmente de gelo de água e são tipicamente do tamanho de bolas de pingue-pongue, bolas de tênis e bolas de basquete.

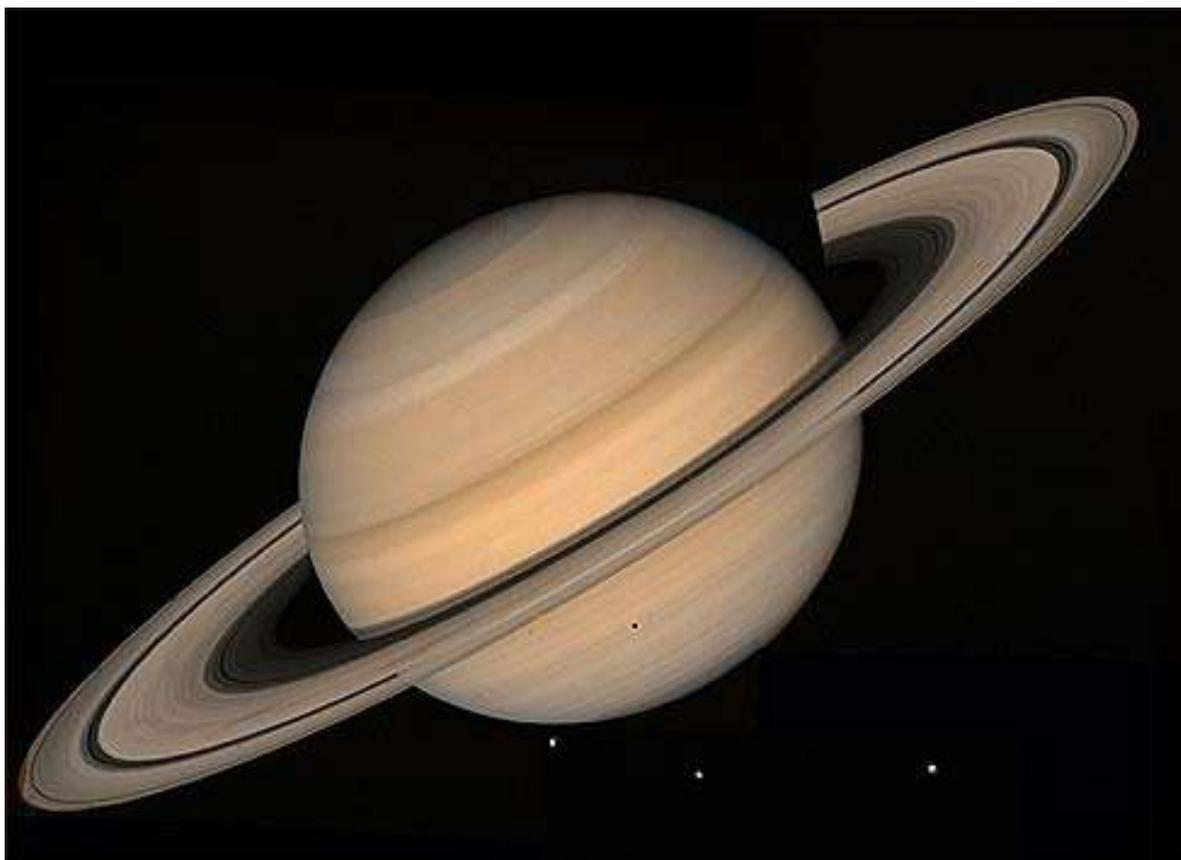


Figura 12.6: Planeta Saturno com seus anéis.

O SISTEMA URANO

O sistema de anéis e luas de Urano (Fig. 12.7 e 12.8) está inclinado a 98° , assim como o próprio planeta. Consiste em 11 anéis e 27 luas atualmente conhecidas. As cinco maiores luas são semelhantes em tamanho às seis luas regulares de Saturno, com diâmetros de 500 a 1600 quilômetros. Descobertos em 1977, os anéis de Urano são fitas estreitas de material escuro com grandes lacunas entre elas. Os astrônomos supõem que as partículas do anel estão confinadas a esses caminhos estreitos pelos efeitos gravitacionais de numerosas pequenas luas, muitas das quais ainda não vislumbramos.

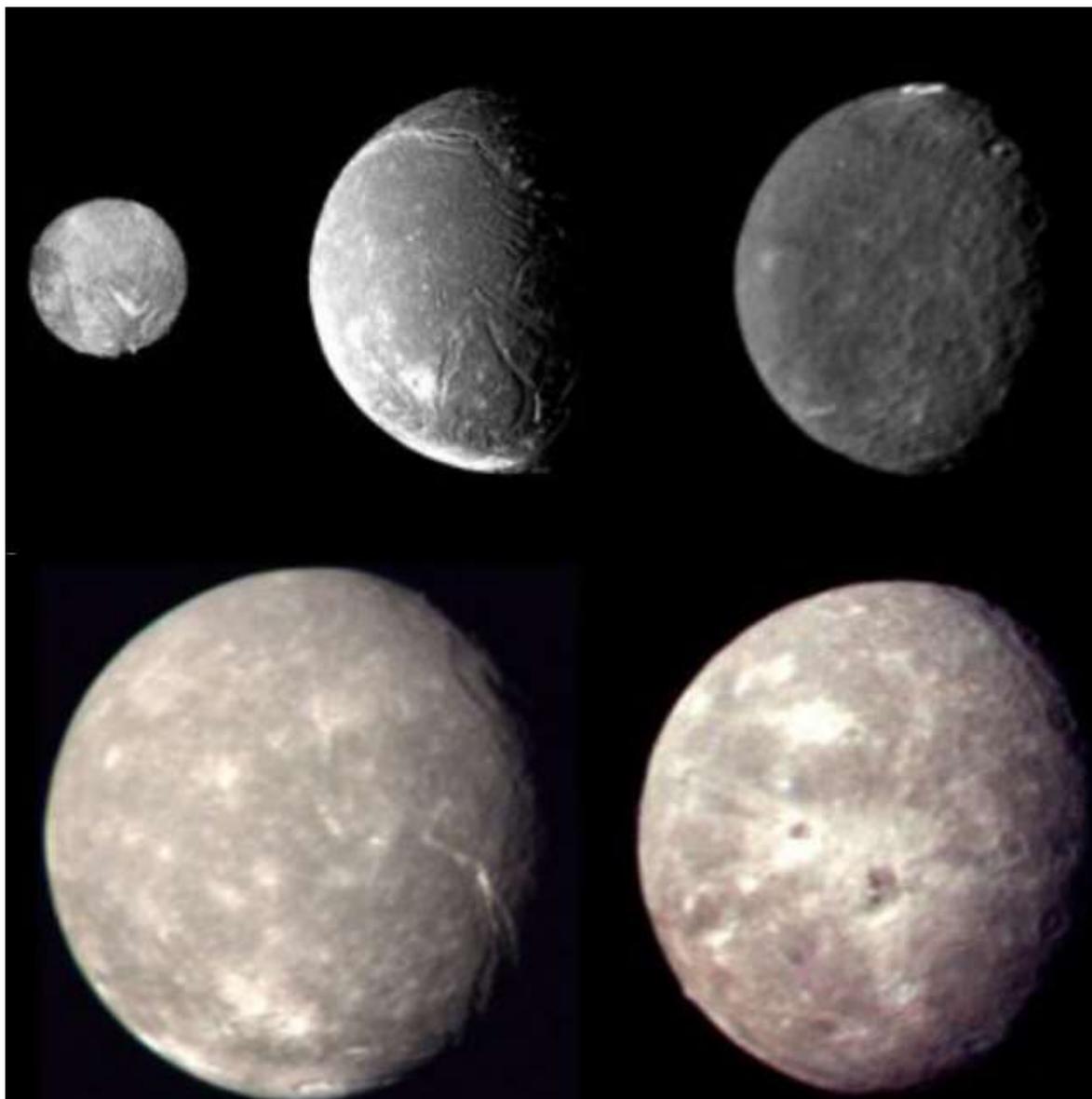


Figura 12.7: Imagens das cinco maiores luas uranianas: Miranda, Ariel, Umbriel, Titânia e Oberon, respectivamente da esquerda para direita. A sonda espacial Voyager 2 tirou estas fotos durante um sobrevoo em 24 de janeiro de 1986.

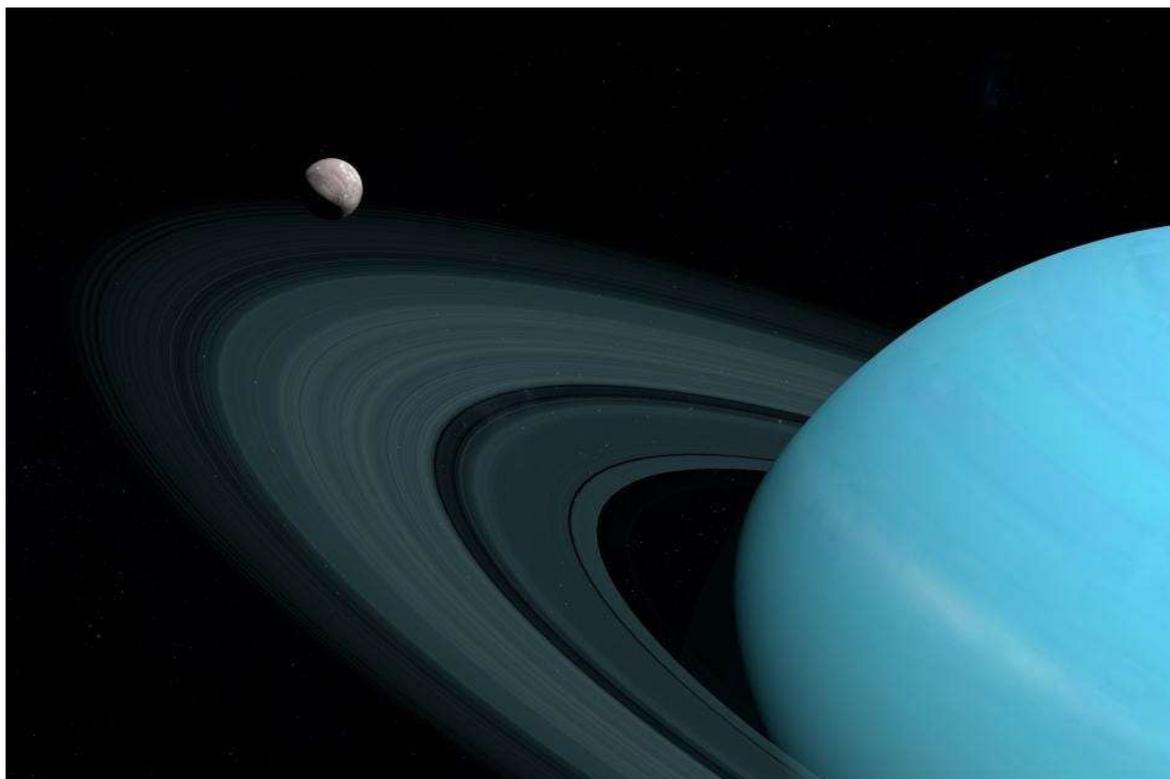


Figura 12.8: Planeta Urano seus anéis e Miranda, uma de suas luas.

O SISTEMA NETUNO

Netuno (Fig. 12.7) tem 14 luas conhecidas. A mais interessante delas é Tritão (ver Fig. 12.8), uma lua relativamente grande em órbita retrógrada – o que é incomum. Tritão tem uma atmosfera muito fina, e erupções ativas foram descobertas pela Voyager em seu sobrevoo de 1989. Para explicar suas características incomuns, os astrônomos sugeriram que Tritão pode ter sua origem além do sistema de Netuno, como um planeta anão como Plutão. Os anéis de Netuno são estreitos e fracos. Como os de Urano, eles são compostos de materiais escuros e, portanto, não são fáceis de ver.

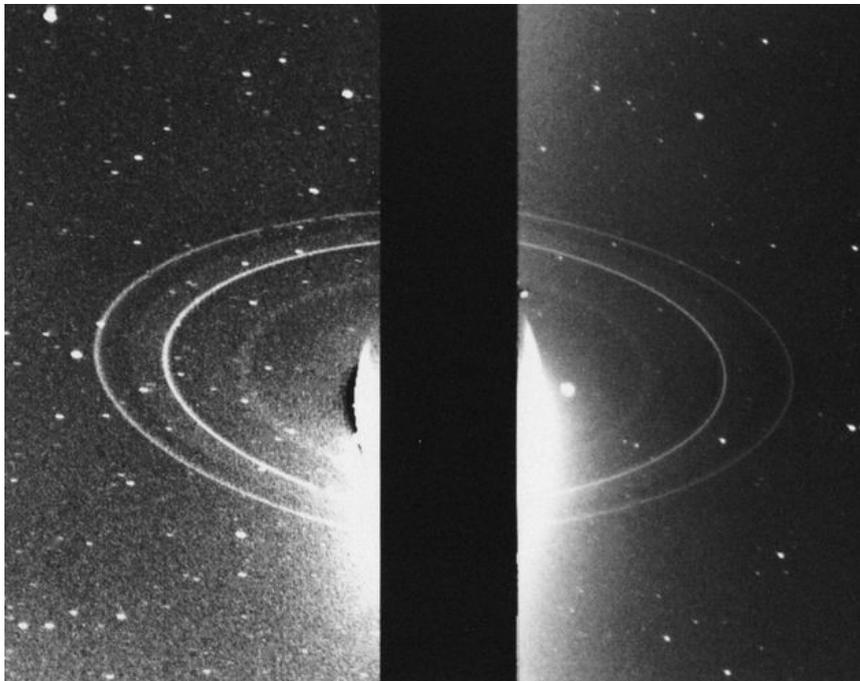


Figura 12.7: O planeta Netuno, baixo o sistema de anéis de Netuno, capturado pela Voyager 2 em agosto de 1989. Os dois anéis mais brilhantes são Adams, o anel mais externo do sistema, e Le Verrier.



Figura 12.8: Algumas das luas de Netuno.

12.4 PLUTÃO E CORANTE

Nossa compreensão de Plutão (e sua grande lua Caronte) mudou drasticamente como resultado do sobrevoo da New Horizons em 2015.

PLUTÃO É UM PLANETA?

Plutão foi descoberto através de uma busca cuidadosa e sistemática. A história da busca por Plutão começou com indicações de que Urano de pequenos desvios de sua órbita prevista, desvios que podem ser devidos à gravitação de um planeta desconhecido. No início do século XX, vários astrônomos, principalmente Percival Lowell, então no auge de sua fama como defensor da vida inteligente em Marte, se interessaram em procurar esse nono planeta.

Lowell e seus contemporâneos basearam seus cálculos principalmente em pequenas irregularidades inexplicáveis no movimento de Urano. Os cálculos de Lowell indicaram duas localizações possíveis para um planeta X perturbador; o mais provável dos dois estava na constelação de Gêmeos. Ele previu uma massa para o planeta intermediária entre as

massas da Terra e Netuno (seus cálculos deram cerca de 6 massas terrestres). Outros astrônomos, no entanto, obtiveram outras soluções a partir das pequenas irregularidades orbitais, incluindo até mesmo um modelo que indicava dois planetas além de Netuno.

Em seu observatório no Arizona, Lowell procurou sem sucesso o planeta desconhecido de 1906 até sua morte em 1916, e a busca não se deu início até 1929. Em fevereiro de 1930, um jovem assistente de observação chamado Clyde Tombaugh, comparando fotografias que ele fez em 23 e 29 de janeiro daquele ano, encontrou um objeto fraco cujo movimento parecia estar de acordo com um planeta muito além da órbita de Netuno (Figura 12.9). O novo planeta recebeu o nome de Plutão, o deus romano do submundo, que vivia na escuridão remota, assim como o novo planeta. A escolha desse nome, entre centenas sugeridas, foi facilitada pelo fato de as duas primeiras letras serem as iniciais de Percival Lowell.

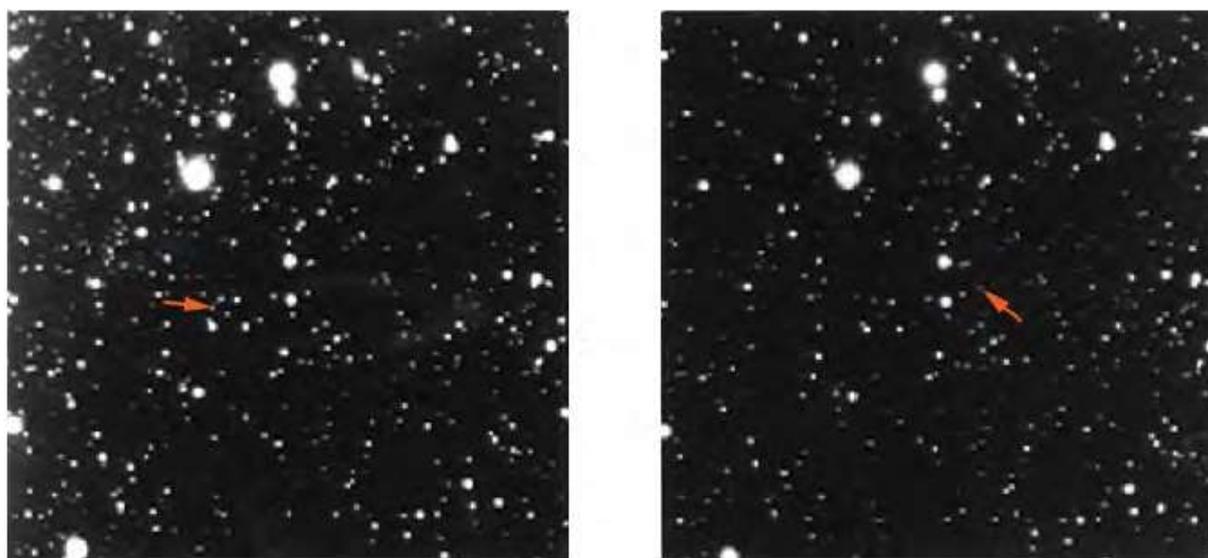


Figura 12.9: Movimento de Plutão. Partes das duas fotografias pelas quais Clyde Tombaugh descobriu Plutão em 1930. A da esquerda foi tirada em 23 de janeiro e a da direita em 29 de janeiro. Observe que Plutão, indicado por uma seta, se moveu entre as estrelas durante essas seis noites. Se não tivéssemos colocado uma seta ao lado dele, você provavelmente nunca teria visto o ponto que se moveu.

Desde o momento de sua descoberta, ficou claro que Plutão não era um gigante como os outros quatro planetas do sistema solar externo. Por muito tempo, pensou-se que a massa de Plutão era semelhante à da Terra, de modo que foi classificado como um quinto planeta terrestre, de alguma forma extraviado nos confins mais distantes do sistema solar. Havia outras anomalias, no entanto, já que a órbita de Plutão era mais excêntrica e inclinada ao plano do

nosso sistema solar do que a de qualquer outro planeta. Somente após a descoberta de sua lua Caronte, em 1978, a massa de Plutão pôde ser medida, e acabou sendo muito menor que a massa da Terra.

Além de Caronte, Plutão tem quatro pequenas luas. Observações subsequentes de Caronte mostraram que esta lua está em uma órbita retrógrada e tem um diâmetro de cerca de 1200 quilômetros, mais da metade do tamanho do próprio Plutão (Fig. 12.9). Isso faz de Caronte a lua cujo tamanho é a maior fração de seu planeta pai. Poderíamos até pensar em Plutão e Caronte como um mundo duplo. Visto de Plutão, Caronte teria o tamanho de oito luas cheias na Terra.



Figura 12.9: Comparação dos tamanhos de Plutão e sua Lua Caronte com a Terra. Esta imagem mostra vividamente o quão pequeno Plutão é em relação a um planeta terrestre como a Terra. Essa é a principal justificativa para colocar Plutão na classe de planetas anões em vez de planetas terrestres.

Para muitos astrônomos, Plutão parecia o primo estranho que todos esperam que não apareça na próxima reunião de família. Nem seu caminho ao redor do Sol nem seu tamanho se assemelham aos planetas gigantes ou aos planetas terrestres. Na década de 1990, os astrônomos começaram a descobrir pequenos objetos no sistema solar mais distante, mostrando que Plutão não era único. Um deles (chamado Eris) é quase do mesmo tamanho que Plutão, e outro (Makemake) é substancialmente menor. Ficou claro para os astrônomos que Plutão era tão diferente dos outros planetas que precisava de uma nova classificação. Por isso, foi chamado de planeta anão, ou seja, um planeta muito menor que os planetas terrestres. Uma história semelhante foi associada à descoberta dos asteroides. Quando o primeiro asteroide (Ceres) foi descoberto no início do século XIX, foi saudado como um novo planeta. Nos anos seguintes, no entanto, outros objetos foram encontrados com órbitas semelhantes a Ceres. Os astrônomos decidiram que nem todos deveriam ser considerados planetas, então inventaram uma nova classe de objetos, chamados planetas menores ou asteroides. Hoje, Ceres também é chamado de planeta anão. Tanto planetas menores quanto planetas anões fazem parte de um cinturão inteiro ou zonas de objetos semelhantes.

Então, Plutão é um planeta? Nossa resposta é sim, mas é um planeta anão.

A NATUREZA DE PLUTÃO

Usando dados da sonda New Horizons, os astrônomos mediram o diâmetro de Plutão em 2.370 quilômetros, apenas 60% do tamanho da nossa Lua. A partir do diâmetro e da massa, encontramos uma densidade de $1,9 \text{ g/cm}^3$, sugerindo que Plutão é uma mistura de materiais rochosos e água congelada em aproximadamente as mesmas proporções de muitas luas de planetas externos.

Partes da superfície de Plutão são altamente refletivas e seu espectro demonstra a presença em sua superfície de metano congelado, monóxido de carbono e nitrogênio. A temperatura máxima da superfície varia de cerca de 50 K quando Plutão está mais distante do Sol a 60 K quando está mais próximo. Mesmo essa pequena diferença é suficiente para causar uma sublimação parcial (passando de sólido para gás) do gelo de metano e nitrogênio. Isso gera uma atmosfera quando Plutão está perto do Sol e congela quando Plutão está mais distante. Observações de estrelas distantes vistas através desta fina atmosfera indicam que a pressão da superfície é cerca de um décimo de milésimo da Terra.

Como Plutão é alguns graus mais quente que Tritão, sua pressão atmosférica é cerca de dez vezes maior. Essa atmosfera contém várias camadas de neblina distintas, presumivelmente causadas por reações fotoquímicas, como as da atmosfera de Titã (Fig. 12.10).

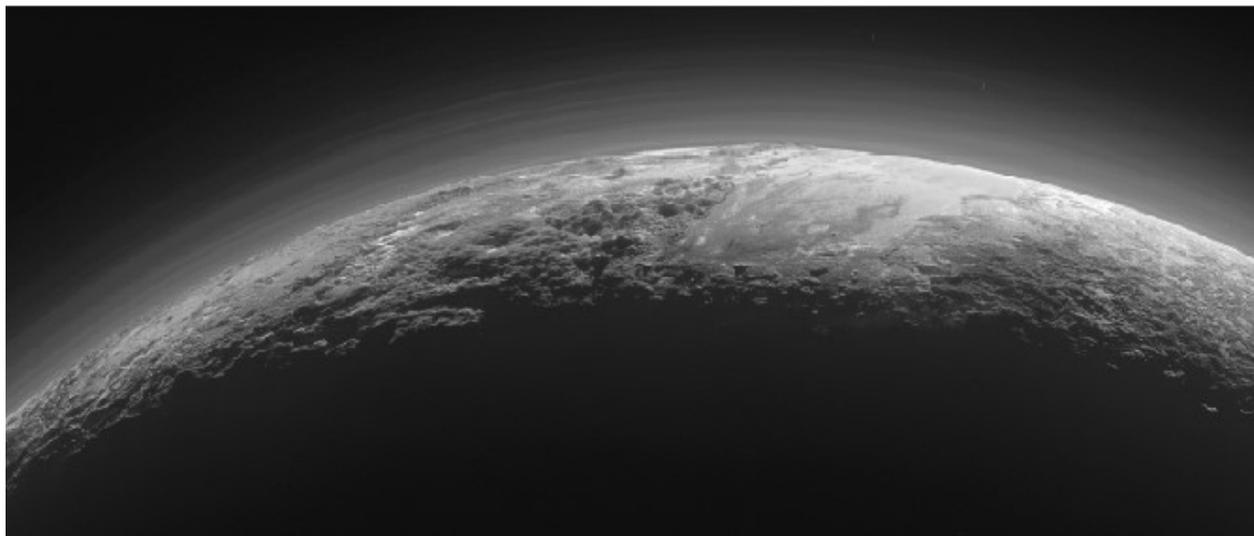


Figura 12.10: Camadas de Neblina na Atmosfera de Plutão. Esta é uma das fotos de maior resolução de Plutão, tirada pela sonda New Horizons 15 minutos após a sua maior aproximação. Ele mostra 12 camadas de neblina. Observe também a cadeia de montanhas com alturas de até 3500 metros.

Plutão não é o mundo geologicamente morto que muitos esperavam para um objeto tão pequeno – longe disso. A divisão da superfície em áreas com diferentes composições e texturas de superfície é aparente na foto colorida global mostrada na Fig. 12.11.



Figura 12.11: Imagem Global Colorida de Plutão. Esta imagem da New Horizons mostra claramente a variedade de terrenos em Plutão. A área escura no canto inferior esquerdo é coberta com crateras de impacto, enquanto a grande área clara no centro e no canto inferior direito é uma bacia plana sem crateras. As cores que você vê são um pouco aprimoradas para destacar diferenças sutis.

A cor avermelhada é aprimorada nesta imagem para destacar as diferenças de cor com mais clareza. As partes mais escuras da superfície parecem ter crateras, mas adjacente a elas há uma área de luz quase inexpressiva no quadrante inferior direito desta imagem. As áreas escuras mostram as cores da neblina fotoquímica ou smog semelhante à da atmosfera de Titã. O material escuro que está manchando essas superfícies antigas pode vir da névoa

atmosférica de Plutão ou de reações químicas que ocorrem na superfície devido à ação da luz solar.

As áreas claras na foto são bacias de planície. Estes são aparentemente mares de nitrogênio congelado, talvez com muitos quilômetros de profundidade. Tanto o nitrogênio quanto o gás metano são capazes de escapar de Plutão quando está na parte de sua órbita próxima ao Sol.