

1

O PLANETA TERRA E SUAS ORIGENS



Umberto G. Cordani

O planeta em que vivemos é formado pelo mesmo material que compõe os demais corpos do Sistema Solar e tudo o mais que faz parte de nosso Universo. Assim, a origem da Terra está ligada intrinsecamente à formação do Sol, dos demais planetas do Sistema Solar e de todas as estrelas a partir de nuvens de gás e poeira interestelar. Por isso, na investigação da origem e evolução de nosso planeta, é necessário recorrer a uma análise do espaço exterior mais longínquo e, ao mesmo tempo, às evidências que temos do passado mais remoto. Com base nas informações decorrentes de diversos campos da Ciência (Física, Química, Astronomia, Astrofísica, Cosmoquímica), bem como estudando a natureza do material terrestre (composição química, fases minerais, etc.), já foram obtidas respostas para algumas importantes questões que dizem respeito à nossa existência:

- Como se formaram os elementos químicos?
- Como se formaram as estrelas?
- Como se formaram os planetas do Sistema Solar?
- Qual é a idade da Terra e do Sistema Solar?
- Qual é a idade do Universo?
- Qual é o futuro do Sistema Solar, e do próprio Universo?

Para as quatro primeiras perguntas já existem evidências suficientes para estabelecer uma razoável confiança nos pesquisadores em relação às suas teorias, baseadas no conhecimento científico, tanto teórico como prático, observacional ou experimental. A quinta e a sexta talvez também possam vir a ser respondidas a contento com o progresso da Ciência.

Contudo, o que existia antes do Universo? Para esta pergunta ainda não temos esperança de resposta no campo do conhecimento científico convencional, e tal questão permanecerá como objeto de considerações filosóficas e metafísicas – tema de âmbito das diferentes religiões, cujos dogmas implicam a presença de um Criador, exercendo sua vontade superior.

1.1 Estrutura do Universo

A Astronomia nos ensina que existem incontáveis estrelas no céu. Ao mesmo tempo, observamos que elas se dispõem de uma maneira ordenada, segundo hierarquias. As estrelas agrupam-se primeiramente em galáxias, cujas dimensões são da ordem de 100.000 anos-luz (distância percorrida à velocidade da luz, 300 mil km/s, durante um ano). As figuras 1.1 e 1.2 apresentam dois exemplos comuns de galáxias tipo elíptico e tipo espiral. A estrutura interna das galáxias pode



Fig. 1.1 A galáxia gigante de Andrômeda (tipo elíptica) – a mais próxima da nossa Sistema Solar (2,4 milhões de anos-luz) – com seu núcleo denso e brilhante contendo bilhões de estrelas. Fonte: NASA.



Fig. 1.2 Exemplo de uma galáxia do tipo espiral (NGC1232).
Fonte: NASA.

conter mais de 100 bilhões de estrelas de todas as dimensões, com incontáveis particularidades. Por exemplo, entre as descobertas que vêm sendo alvo de estudos rádio-astronômicos estão os *quasars*, objetos peculiares com dimensão semelhante à do nosso Sistema Solar, mas contendo imensa quantidade de energia e brilhando com extrema intensidade. As galáxias podem conter enormes espaços interestelares de baixa densidade, mas também regiões de densidade extrema. Os assim chamados **buracos negros** podem sugar qualquer matéria das proximidades, em virtude de sua gigantesca energia gravitacional. Nem mesmo a luz consegue escapar dos buracos negros, e o seu estudo é um dos temas de fronteira da Astronomia.

A **Via Láctea** é também uma galáxia do tipo espiral, sendo que o Sol – a estrela central de nosso Sistema Solar – está situado num de seus braços periféricos. A Via Láctea possui também um núcleo central, onde aparecem agrupamentos de estrelas jovens.

As galáxias, por sua vez, se agrupam nos assim chamados **aglomerados**, que podem conter entre algumas dezenas a alguns milhares de galáxias. A Via Láctea pertence ao chamado Grupo Local, que inclui também a galáxia de Andrômeda e as Nuvens de Magalhães. Finalmente, o maior nível hierárquico do

Universo é o de superaglomerados, compostos de até dezenas de milhares de galáxias, e com extensões que atingem centenas de milhões de anos-luz.

As observações astronômicas nos conduzem a pelo menos duas reflexões relevantes para os temas da origem do Universo e da matéria nele concentrada:

- uma visão retrospectiva, visto que a observação das feições mais distantes nos leva à informação de épocas passadas, quando os objetos observados eram mais jovens. São as observações das regiões no limite do observável, que refletem eventos ocorridos há vários bilhões de anos (Fig. 1.3);



Fig. 1.3 Imagem obtida pelo telescópio Hubble numa das partes mais distantes do Sistema Solar. Os três objetos com raios são estrelas, enquanto os demais objetos visíveis são galáxias, cada uma delas contendo muitos bilhões de estrelas. Os objetos menores e menos luminosos são galáxias que distam cerca de 11 bilhões de anos-luz em relação ao Sistema Solar. Fonte: NASA.

- uma visão comparativa, que possibilita a reconstrução do ciclo de evolução estelar, visto que existe uma grande diversidade de tipologia nas estrelas, em relação à sua massa, tamanho, cor, temperatura, idade, etc. Embora a se saiba que a vida de uma estrela é muito longa, dada a ordem de diversos bilhões de anos, o grande número de estrelas disponíveis para observação faz com que seja possível verificar a existência de muitas delas em diferentes fases da evolução estelar, desde a sua formação até o seu desaparecimento ou a sua transformação em outro objeto diferente do Universo.

O Universo encontra-se em expansão. Não é a distância entre as estrelas de uma galáxia que está aumentando, e nem a distância entre as galáxias de um aglomerado, visto que tanto as primeiras como as últimas estão ligadas entre si pela atração da gravidade. A expansão do Universo significa que aumenta continuamente o espaço entre os aglomerados galácticos que não estão suficientemente ligados pela atração gravitacional. A velocidade desta expansão é dada pela **constante de Hubble**, ainda não determinada com grande precisão, e que presentemente parece se situar próxima de $18 \text{ km/s.}10^6 \text{ anos-luz}$. Se o nosso Universo for “aberto”, este valor permanecerá constante, ou poderá aumentar no futuro. Se entretanto o Universo for “fechado”, a velocidade de expansão diminuirá com o tempo, tenderá a anular-se e em seguida tomará valores negativos característicos de contração.

A Astronomia ainda não está segura quanto à natureza aberta ou fechada do Universo, pois isto depende de sua densidade média, cujo valor não se encontra estabelecido adequadamente. O valor limite entre Universo aberto e fechado, chamado de **densidade crítica**, é dado por $\rho_0 = 3 H_0^2 / 8\pi G$, onde H_0 é a constante de Hubble e G a constante gravitacional. Para o valor mencionado acima de H_0 a densidade crítica é de $6,5 \times 10^{-30} \text{ g/cm}^3$. Observações recentes (ver os comentários finais deste capítulo) sugerem que a densidade média tem valor inferior ao crítico, indicando um Universo aberto, portanto tendendo a expandir-se para sempre. Entretanto, é difícil medir essa densidade em virtude da existência da chamada matéria escura, de complicada caracterização e de presença ubíqua em todo o espaço interestelar. Este material, virtualmente invisível, consiste de neutrinos e possivelmente de outras partículas desconhecidas que interagem apenas por forças de gravidade com a matéria conhecida. Muitos cientistas acreditam que esta matéria invisível estaria presente no Universo em quan-

tidade muito superior à da matéria visível, e nesse caso a densidade média poderia superar o valor crítico, apontando assim para um Universo “fechado”.

1.2 Como Nasceu o Universo

Se nosso Universo for fechado, isto é, se sua densidade média for superior a $6,5 \times 10^{-30} \text{ g/cm}^3$, sua velocidade de expansão deverá diminuir até anular-se, e em seguida ele deverá implodir sobre si mesmo, num colossal *cosmocrunch*, no futuro longínquo, daqui a muitas dezenas de bilhões de anos. Toda a matéria estará reunida numa singularidade, um espaço muito pequeno de densidade extremamente alta, virtualmente infinita, e sob uma temperatura também extremamente alta, virtualmente infinita. Nesta singularidade que foge a qualquer visualização, matéria e energia seriam indistinguíveis, não haveria espaço em seu entorno e o tempo não teria sentido.

Esta pode ter sido a situação existente cerca de 15 bilhões de anos atrás, o ponto de partida de tudo o que nos diz respeito, um ponto reunindo toda a matéria e energia do Universo, que explodiu no evento único e original que os físicos denominaram Grande Explosão, ou *Big Bang*.

Por meio do conhecimento existente sobre matéria e energia, radiações, partículas elementares, e fazendo uso dos recursos da Física teórica, incluindo modelagens e simulações, os cientistas reconstituíram com grande precisão as etapas sucessivas à Grande Explosão. Segundo dizem, tendo como situação de partida o *ylem* imaginado recentemente por Gamow, e iniciado o *Big Bang*, o resto é perfeitamente previsível. A Tabela 1.1 reúne os eventos ocorridos por ocasião da origem do Universo, ordenados cronologicamente. A Ciência não tem elementos para caracterizar o período que os físicos denominam **Planckiano**, decorrido logo após o instante inicial. Trata-se do tempo necessário para a luz atravessar o comprimento de Planck, a unidade fundamental de comprimento, pois não é possível saber se as constantes fundamentais que governam nosso mundo já atuavam naquelas condições. Durante os 3×10^{-10} segundos iniciais a temperatura era alta demais para a matéria ser estável, tudo era radiação. Ainda hoje, o espectro da radiação de microondas de fundo (*microwave background radiation*) que pervaga o Universo em todas as direções do espaço, como remanescente da radiação emitida, é uma das maiores evidências para a teoria do *Big Bang* e implica que a radiação original partiu para todos os lados com a mesma temperatura.

Tabela 1.1 Cronologia do Big Bang, mostrando que Tempo e Espaço são grandezas físicas que nasceram junto com a Grande Explosão.

Tempo	Raio do universo (metros)	Temperatura (K)	Eventos
Zero (inicial)	Zero	Infinita	Aparecimento de espaço, tempo e energia.
$5,4 \times 10^{-44}$ s	$1,6 \times 10^{-35}$	10^{32}	Fim do período Planckiano.
10^{-43} s	3×10^{-35}	10^{31}	Separação da Gravidade.
10^{-35} s	3×10^{-27}	10^{28}	Separação das forças Nuclear-Forte e Elétrica-fraca.
$10^{-33} - 10^{-32}$ s	3×10^{-27} até 0,1	10^{27} até 10^{22}	Fase inflacionária.
10^{-10} s	0,13	10^{15}	Separação das forças Nuclear-Fraca e Eletromagnética.
10^{-9} s	0,4	$7,5 \times 10^{14}$	Estabilizam-se os <i>quarks</i> do tipo t (massa ~ 50 u).
		$7,5 \times 10^{13}$	Estabilizam-se os <i>quarks</i> do tipo b (massa = 5 u).
10^{-6} s	300	$1,3 \times 10^{13}$	Estabilizam-se os <i>quarks</i> do tipo c (massa = 1,8 u).
		$3,3 \times 10^{12}$	Estabilizam-se os <i>quarks</i> do tipo s, d e u (massas 0,5 – 0,4 u).
		$\sim 10^{12}$	Estabilizam-se prótons e nêutrons.
10^{-3} s	300.000	$1,4 \times 10^{10}$	Estabilizam-se os núcleos ^2H (energia de ligação = 1,7 MeV).
10 s	3×10^9	$4,1 \times 10^9$	Estabilizam-se os elétrons (massa = 0,00055 u).
100 s	3×10^{10}	$1,5 \times 10^9$	Estabilizam-se os núcleos ^3He e ^4He .
800.000 anos	$6,6 \times 10^{21}$	3.000	Captura de elétrons pelos núcleos. Formação de átomos de H e He e moléculas H_2 . O Universo torna-se transparente para a luz.

Obs: u = $1,660540 \times 10^{-27}$ kg.

Com a expansão e a criação contínua do espaço, foram surgindo as quatro forças fundamentais da natureza que incluem a força eletromagnética, as forças nucleares forte e fraca (que só têm influência no interior do núcleo atômico), e a força da gravidade que, de longe, é a mais familiar a todos nós. Contudo, a força da gravidade por ser muito fraca é difícil de ser medida (na verdade, sua medida equivale à constante G). Houve também uma fase de expansão extremamente rápida (fase inflacionária), em que a velocidade da expansão foi até maior do que a velocidade da luz. Com base nesse modelo, os astrofísicos explicam as feições anômalas observadas em nosso Universo. Implica também que pode ter-se originado da mesma forma uma quantidade enorme de outros universos que jamais seremos capazes de conhe-

cer, visto que, após a fase inflacionária, estes teriam sua própria expansão e evolução muito distante de nós, de modo que sua luz não nos alcançaria.

Após 10^{-32} segundos, nosso universo inflado, o universo visível, teria sua expansão governada pela constante de Hubble, e sua evolução o levaria até o estágio atual, em que seu raio é da ordem de 15 bilhões de anos-luz.

Nesta evolução primitiva, a temperatura e a densidade de energia foram decrescendo, e foram criadas as condições para a formação da matéria, no processo denominado **nucleogênese**: prótons, nêutrons, elétrons e em seguida os átomos dos elementos mais leves. Primeiramente H e He – os dois elementos principais da matéria do Universo – e posteriormente Li e Be. Com pouco menos de um

milhão de anos de vida, a temperatura do Universo encontrava-se em cerca de 3.000 K, e a energia estava suficientemente baixa para permitir que os átomos permanecessem estáveis. Com a captura dos elétrons pelos átomos em formação, o Universo embrionário tornou-se transparente à luz, sendo constituído por H (74%), He (26%), além de quantidades muito diminutas de Li e Be.

Por outro lado, quando a temperatura decresceu para valores abaixo de alguns milhões de graus, nenhum outro elemento teve condição de ser criado. As estrelas e as galáxias formaram-se mais tarde, quando o resfriamento generalizado permitiu que a matéria viesse a se confinar em imensas nuvens de gás. Estas, posteriormente, entrariam em colapso gravitacional pela ação da força de gravidade, e seus núcleos se aqueceriam, levando à formação das primeiras estrelas. As primeiras galáxias surgiram por volta de 13 bilhões de anos atrás. A Via Láctea tem aproximadamente 8 bilhões de anos de idade e dentro dela o nosso Sistema Solar originou-se há cerca de 4,6 bilhões de anos.

1.3 Evolução Estelar e Formação dos Elementos

No Universo em expansão havia variações de densidade como em gigantescas nuvens em movimento, com regiões de grande turbulência. Embora sua densidade fosse muito baixa, eram tão vastas que sua própria atração gravitacional era suficiente para produzir contração, ao mesmo tempo em que o seu momento angular impedia a sua rápida implosão. Na medida em que elas foram se contraindo e a densidade aumentando, algumas regiões menores com densidade maior passaram a se autocontrair, e a grande nuvem dividiu-se em nuvens menores separadas, mas orbitando entre si. O progresso da contração gravitacional resultou na hierarquia hoje reconhecida, com as galáxias pertencendo a aglomerados, que por sua vez formam superaglomerados.



Fig. 1.4 Nebulosa do Caranguejo. Trata-se de uma grande nuvem de gás, localizada na constelação de Touro, originada pela explosão de uma supernova, ocorrido no ano de 1054 e registrado por vários povos na época. Fonte: NASA.

As estrelas nascem pela radicalização do processo de contração, a partir das mencionadas nuvens de gás (**nebulosas**), constituídas quimicamente por grande quantidade de Hidrogênio e Hélio, além de alguns outros gases e partículas sólidas que integram a **poeira interestelar** (Fig. 1.4). Observações astronômicas revelam regiões onde está ocorrendo o fenômeno da formação de estrelas, em nebulosas de enorme massa e baixa densidade. No interior destas, um volume menor com densidade ligeiramente mais alta entra em autocontração, e o material tende ao colapso produzindo uma esfera, na região central, tornando-se uma proto-estrela. Daí em diante continuará a contrair para compensar a perda de calor pela sua superfície, desenvolvendo temperaturas progressivamente mais elevadas em seu centro.

A evolução das estrelas, tal como será relatada a seguir, encontra-se sintetizada na Fig. 1.5, que representa o diagrama de Hertzsprung-Russell (H-R). Neste gráfico, a maioria das estrelas situa-se perto da curva representada, desde o canto inferior direito (baixa temperatura e baixa luminosidade) até o canto superior esquerdo (alta temperatura e alta luminosidade). Esta região no diagrama é denominada **Seqüência Principal**, com a estrela de massa unitária (Sol = $1 M_{\odot}$) ocupando a posição central. Uma certa concentração de estrelas aparece acima e para a direita da Seqüência Principal, enquanto apenas algumas aparecem abaixo dela.

Quando uma estrela nasce, seu material está ainda muito diluído e expandido. Sua temperatura superficial é baixa, de modo a situar-se na porção inferior direita do diagrama H-R. Com sua contração, temperatura e luminosidade aumentam, e a estrela vai ocupando posições sucessivamente mais para cima

e mais para a esquerda no diagrama. A queima de Hidrogênio – a reação termonuclear característica das estrelas que se situam na Seqüência Principal, em que pela fusão de quatro núcleos de Hidrogênio forma-se um de ^4He – inicia-se quando as temperaturas centrais da estrela em formação atingem 10^8 K. Esta reação libera uma imensa quantidade de energia, muitos milhões de vezes superior àquela que seria causada pela queima química do H. Desta forma, a estrela pode continuar queimando H durante bilhões de anos, como é o caso do Sol, visto que tal produção de energia compensa e equilibra a tendência à contração pela ação da gravidade.

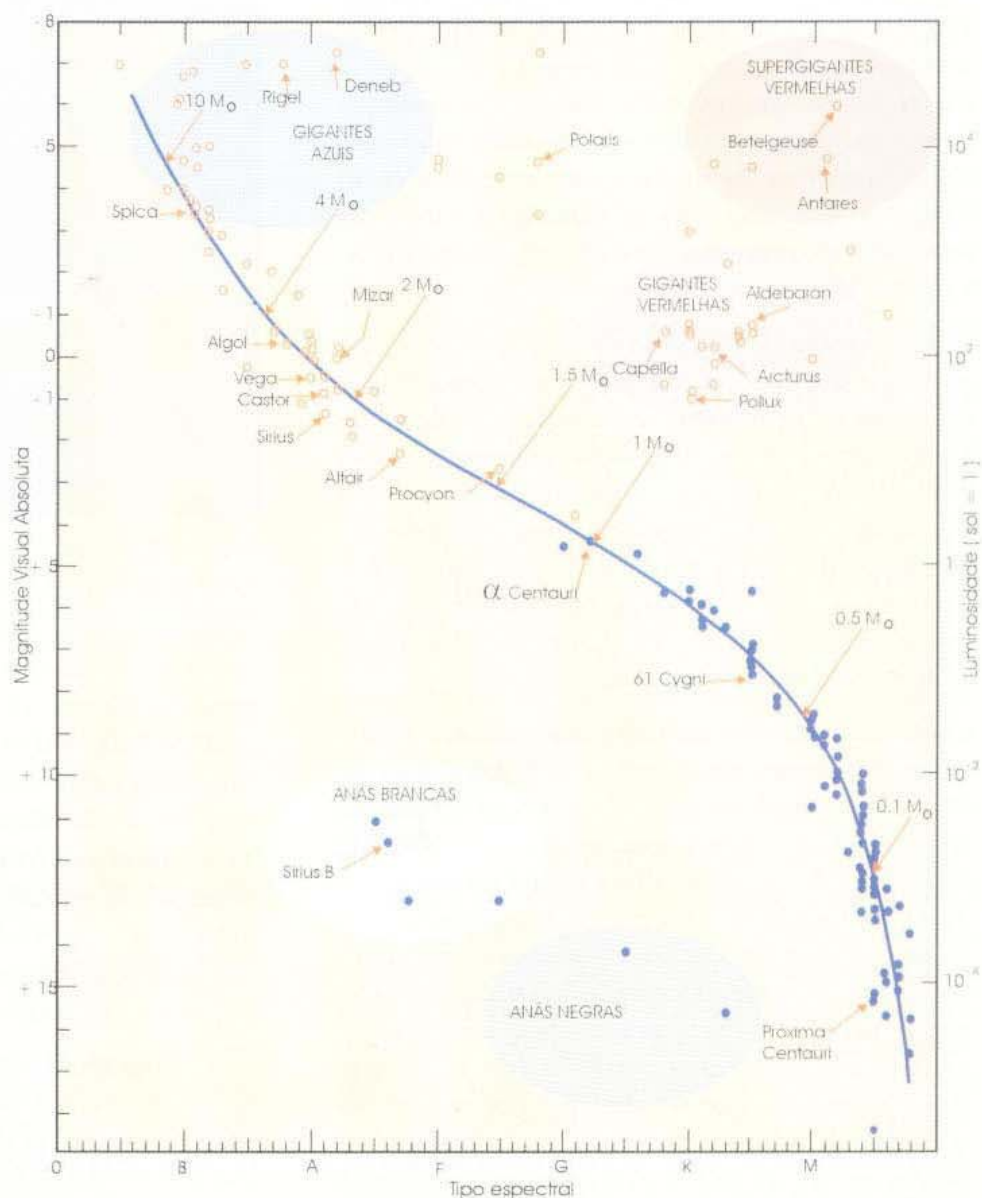


Fig. 1.5 Diagrama H-R (Hertzsprung-Russell), no qual o tipo espectral (que depende da cor e da temperatura da superfície) de muitas estrelas cujas distâncias são conhecidas, está representado em função da luminosidade (relativa ao Sol = 1).

A queima do H no centro das estrelas, onde a temperatura é máxima, produz He, elemento que permanece onde é formado, visto que o calor produzido é transferido para as camadas mais externas por radiação, e não por convecção. A acumulação de He forma um núcleo que cresce, com o H em ignição, confinado a uma camada concêntrica externa a esse núcleo. Com o crescimento do núcleo, a parte externa da estrela expande muito, e sua superfície esfria, assumindo uma coloração vermelha. É a fase denominada **gigante vermelha** (Fig. 1.4). Nesta fase o núcleo se contrai novamente pela atração gravitacional, e a temperatura central aumenta muito, para valores da ordem de 10^8 K. Inicia-se a queima do He, que pode durar muitos milhões de anos, formando C pela fusão de três partículas alfa. Em seguida, com o esgotamento do He, nova contração do núcleo e novo aumento de temperatura acarretam uma enorme expansão da estrela. Trata-se da fase de **supergigante vermelha**. Se o Sol atingir esta fase, daqui a cerca de 5 bilhões de anos, seu tamanho estender-se-á para além da órbita de Marte.

Em estrelas de tamanho médio, como é o caso do Sol, o núcleo de C é muito quente, mas não o suficiente para produzir fusões nucleares, de modo que cessam as reações produtoras de energia. Como resultado, o núcleo contrai ulteriormente, e a sua densidade aumenta, originando uma **anã branca**. Tais tipos de estrela perdem sua energia residual continuamente, por radiação, esfriando durante outros bilhões de anos, transformando-se em anãs marrons, e finalmente, em anãs negras.

Por outro lado, em estrelas cujo tamanho é pelo menos oito vezes maior que o do Sol, em suas fases de supergigantes vermelhas, a temperatura do núcleo de C é suficiente para produzir O, Ne e Mg pela adição de partículas alfa, e posteriormente fundir O, formando Si e outros nuclídeos de número de massa mais elevado. Tais processos, em que os resíduos da queima de combustível nuclear se acumulam no núcleo para em seguida queimarem por sua vez em outra reação termonuclear mais complexa, fazem com que as estrelas se constituam por uma série de camadas concêntricas. As reações nucleares cessam quando o elemento Fe é sintetizado (processos de equilíbrio, ou *e-processes*), visto que este elemento é o mais estável de sua região na curva de energia de ligação, e por isso uma fusão nuclear ulterior consumiria energia ao invés de produzi-la.

Cada estágio sucessivo de queima, desde o H até o Fe, libera menos energia que o anterior. A diminuição da fonte de energia coincide com a necessidade crescente de energia para as etapas posteriores da evolução estelar, de modo que estas são sucessivamente muito mais rápidas do que as anteriores, e especialmente a fase de estabilidade, quando a estrela permanece ao longo da Seqüência Principal. Uma estrela que permaneceu durante bilhões de anos queimando H e depois He, passa extremamente rápido pela fase dos processos de equilíbrio, em segundos apenas, formando Fe, para ter imediatamente seu combustível nuclear esgotado em sua parte central. Nesta situação, a temperatura aumenta muito, a contração torna-se insustentável, e a estrela implode em frações de segundo comprimindo as partículas e formando uma estrela de nêutrons com diâmetro da ordem de apenas alguns quilômetros.

Nas camadas mais externas da estrela permanece grande quantidade de elementos ainda não queimados: H, He, C, O etc. A implosão do centro causa o colapso generalizado de tais camadas externas, com o concomitante grande aumento da temperatura. A quantidade de energia liberada é tão grande, em tão pouco tempo (menos de um segundo), que a estrela explode literalmente, lançando para o espaço a maior parte de seu material, num evento único no céu, um grande espetáculo para os astrônomos, e que caracteriza a fase de **supernova** (Fig. 1.6). Nesta explosão, grande número de nêutrons é liberado pela fissão dos nuclídeos mais pesados, e esses nêutrons são imediatamente capturados por outros nuclídeos, dando origem aos processos denominados r (*rapid* - rápidos) e s (*slow* - lentos) de formação de elementos novos. A prova da **nucleossíntese** pelas supernovas está na detecção do espectro de certos elementos instáveis, como o Tecnécio, ou alguns elementos transurânicos, tal como foi observado recentemente pelos astrofísicos.

O diagrama H-R tem fundamental importância no entendimento da evolução estelar, descrita antes, visto que podem ser observadas estrelas individuais em todas as etapas evolutivas, e determinadas as suas propriedades através de análises espectrais de diversos tipos. Após longa permanência sobre a Seqüência Principal, produzindo He, a luminosidade das estrelas aumenta nas fases seguin-

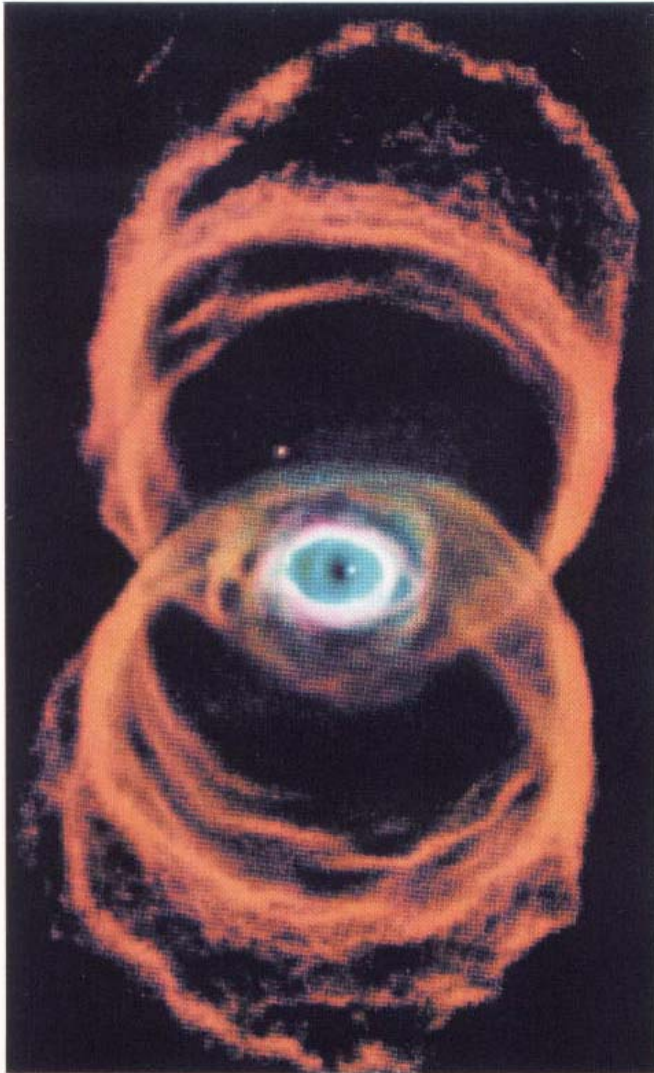


Fig. 1.6 Exemplo de fase de supernova. Nebulosa com formato de uma "ampulheta", mostrando os anéis ejetados de gases (N, H, O) resultantes de sua explosão. Fotografia tomada do telescópio Hubble. Fonte: NASA.

tes, de gigante vermelha e de supergigante vermelha, mas diminui a temperatura de sua superfície, por causa da expansão. As estrelas se deslocam então para a parte superior direita do diagrama (Fig. 1.4). Por outro lado, com a perda de luminosidade que antecede a morte das estrelas, as anãs brancas vão se situar na parte inferior do diagrama, abaixo da Sequência Principal.

Assim, os elementos constituintes do Universo foram formados em parte durante a nucleogênese, nos tempos que se sucederam ao *Big Bang* (basicamente H e He), ou então foram sintetizados no interior das estrelas em processos denominados genericamente de nucleossíntese. Aqueles com número atômico intermediário entre o He e o Fe

formaram-se durante a evolução das estrelas, nas partes centrais das gigantes vermelhas, enquanto aqueles com número atômico superior ao do Fe originaram-se unicamente naqueles instantes mágicos das explosões das supernovas. Ao mesmo tempo, desaparecendo a estrela-mãe, toda a sua matéria foi devolvida ao espaço interestelar, fertilizando-o e possivelmente dando início a um novo ciclo de evolução estelar.

Somente as estrelas de massa gigantesca podem evoluir até a fase de supernova. Estima-se que em cada galáxia ocorrem duas ou três explosões de supernovas em cada século. O evento mais brilhante parece ter sido aquele registrado no ano 1054, cuja matéria, espalhada pela explosão, deu origem à Nebulosa do Caranguejo (Fig. 1.4).

Existe uma relação íntima entre a origem do Universo e a dinâmica das estrelas, por um lado, e abundância dos elementos nos sistemas estelares, por outro. Explosões de supernovas têm como consequência importante que os novos elementos formados, primeiramente no interior da estrela, e posteriormente durante a explosão, são devolvidos ao espaço e misturados ao meio interestelar, essencialmente constituído no início de H e He. Desta forma, as novas estrelas a se formarem a partir de tal mistura já começariam a sua evolução com um complemento de elementos pesados, incluindo-se aí os isótopos radioativos de meia-vida longa, como U e Th. Este é o mecanismo pelo qual o Universo se torna progressivamente mais rico em elementos pesados. Estrelas formadas recentemente possuem cerca de 100 a 1.000 vezes mais Fe e outros elementos mais pesados do que aquelas mais antigas, formadas em épocas mais próximas da origem do Universo.

O Sistema Solar foi formado há "apenas" 4,6 bilhões de anos, quando o Universo já contava de 8 a 10 bilhões de anos de idade. A **nebulosa solar** resultou possivelmente da explosão de uma supernova, cuja massa estimada teria sido de aproximadamente 8 massas solares, e que em sua fase final teria sintetizado os elementos pesados que hoje constituem o Sol e seus planetas (Fig. 1.7). Portanto, a matéria constituinte dos corpos planetários do Sistema Solar possui certa quantidade de elementos pesados, e constituição química coerente (ver as denominadas **abundâncias solares** na Tabela 1.2).

Tabela 1.2 Abundância Solar dos elementos. Embora existam diferenças de estrela para estrela, por causa da própria dinâmica interna, a abundância solar é tida como um valor médio representativo da constituição química do Universo, também chamada abundância cósmica (valores em átomos/ 10^6 Si).

Z	Elemento	Abundância	Z	Elemento	Abundância	Z	Elemento	Abundância
1	H	$2,72 \times 10^{10}$	29	Cu	514	58	Ce	1,16
2	He	$2,18 \times 10^9$	30	Zn	1.260	59	Pr	0,174
3	Li	59,7	31	Ga	37,8	60	Nd	0,836
4	Be	0,78	32	Ge	118	62	Sm	0,261
5	B	24	33	As	6,79	63	Eu	0,0972
6	C	$1,21 \times 10^7$	34	Se	62,1	64	Gd	0,331
7	N	$2,48 \times 10^6$	35	Br	11,8	65	Tb	0,0589
8	O	$2,01 \times 10^7$	36	Kr	45,3	66	Dy	0,398
9	F	843	37	Rb	7,09	67	Ho	0,0875
10	Ne	$3,76 \times 10^6$	38	Sr	23,8	68	Er	0,253
11	Na	$5,70 \times 10^4$	39	Y	4,64	69	Tm	0,0386
12	Mg	$1,075 \times 10^6$	40	Zr	10,7	70	Yb	0,243
13	Al	$8,49 \times 10^4$	41	Nb	0,71	71	Lu	0,0369
14	Si	$1,00 \times 10^6$	42	Mo	2,52	72	Hf	0,176
15	P	$1,04 \times 10^4$	44	Ru	1,86	73	Ta	0,0226
16	S	$5,15 \times 10^5$	45	Rh	0,344	74	W	0,137
17	Cl	5.240	46	Pd	1,39	75	Re	0,0507
18	Ar	$1,04 \times 10^5$	47	Ag	0,529	76	Os	0,717
19	K	3.770	48	Cd	1,69	77	Ir	0,660
20	Ca	$6,11 \times 10^4$	49	In	0,184	78	Pt	1,37
21	Sc	33,8	50	Sn	3,82	79	Au	0,186
22	Ti	2.400	51	Sb	0,352	80	Hg	0,52
23	V	295	52	Te	4,91	81	Tl	0,184
24	Cr	$1,34 \times 10^4$	53	I	0,90	82	Pb	3,15
25	Mn	9.510	54	Xe	4,35	83	Bi	0,144
26	Fe	$9,00 \times 10^5$	55	Cs	0,372	90	Th	0,0335
27	Co	2.250	56	Ba	4,36	92	U	0,0090
28	Ni	$4,93 \times 10^4$	57	La	0,448			

1.4 O Sistema Solar

Nosso Sol é uma estrela de média grandeza, ocupando a posição central na Sequência Principal no diagrama H-R (Fig. 1.5). Como tal, encontra-se formando He pela queima de H, há cerca de 4,6 bilhões de anos. Possivelmente, permanecerá nesta fase por outros tantos bilhões de anos, antes de evoluir para a fase de gigante vermelha, anã branca, e finalmente tornar-se uma anã negra.

Os demais corpos que pertencem ao Sistema Solar (planetas, **satélites**, **asteróides**, **cometas**, além de poeira e gás) formaram-se ao mesmo tempo em que sua estrela central. Isto confere ao sistema uma organização harmônica no tocante à distribuição de sua massa e às trajetórias orbitais de seus corpos maiores, os planetas e satélites. A massa do sistema (99,8 %) concentra-se no Sol, com os planetas girando ao seu redor, em órbitas elípticas de pequena excentricidade, virtualmente coplanares, segundo um plano básico denominado **eclíptica**. Neste plano estão assentadas, com pequenas inclinações, as órbitas de todos os planetas, e entre Marte e Júpiter orbitam também numerosos asteróides. Por sua vez, a grande maioria dos cometas parece seguir também órbitas próximas do plano da eclíptica. O movimento de todos estes corpos ao redor do Sol concentra praticamente todo o momento angular do sistema.

A Tabela 1.3 reúne os principais parâmetros físicos dos planetas do Sistema Solar. São, de dentro para fora do sistema: Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Netuno e Plutão. Pode-se verificar que suas distâncias em relação ao Sol obedecem a uma relação empírica (a denominada '**lei de Titius-Bode**'), proposta por J.E. Bode :

$$d = 0,4 + 0,3 \times 2^n$$

na qual d é a distância heliocêntrica em unidades astronômicas (UA = distância média entre a Terra e o Sol, equivalente a cerca de 150 milhões de km), e n é igual a $-\infty$ para Mercúrio, zero para Vênus, e tem números de 1 a 8 para os planetas (Terra até Plutão). Os asteróides têm $n = 3$.

As características geométricas, cinemáticas e dinâmicas dos planetas do Sistema Solar foram condicionadas pela sua origem comum. Os planetas podem ser classificados em internos (ou terrestres, ou telúricos) e externos (ou jovianos). Pela

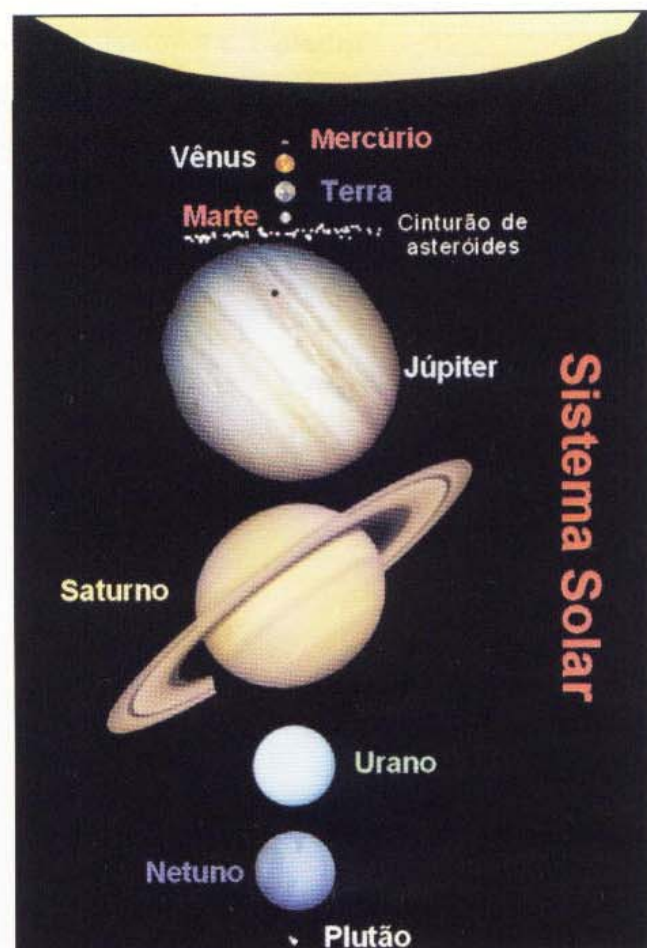


Fig. 1.7 O Sistema Solar. Os quatro planetas internos situam-se mais perto do Sol e são rochosos e menores em tamanho, enquanto os quatro planetas externos são gigantes; estes possuem satélites majoritariamente gasosos e com núcleos rochosos. O planeta mais distante, Plutão, é um pequeno corpo congelado de metano, água e rocha. Notar o cinturão de asteróides que se localiza entre o grupo de planetas internos e externos.

Tabela 1.3, verifica-se que os planetas internos possuem massa pequena e densidade média semelhante à da Terra, da ordem de 5 g/cm^3 , enquanto que os planetas externos possuem massa grande e densidade média próxima à do Sol. Os incontáveis corpos de dimensões menores, que orbitam no cinturão de asteróides (o maior asteróide conhecido, Ceres, tem diâmetro da ordem de 970 km), apresentam características variáveis, porém mais assemelhadas àquelas dos planetas internos. Os planetas internos possuem poucos satélites e atmosferas finas e rarefeitas. Já os planetas externos possuem normalmente mais satélites e suas atmosferas são muito espessas e de composição muito parecida à do Sol, com predominância de H e He.

Tabela 1.3 Parâmetros físicos dos planetas do Sistema Solar.

Planeta	Mercúrio	Vênus	Terra	Marte	Júpiter	Saturno	Urano	Netuno	Plutão
Raio($R_{\oplus}$)	0,38	0,95	1	0,53	11,21	9,45	4	3,88	0,18
Massa($M_{\oplus}$)	0,055	0,814	1	0,104	317,7	99,66	14,53	17,06	0,002
Densidade (g/cm ³)	5,4	5,2	5,5	3,9	1,3	0,7	1,3	1,6	2
Atmosfera (%)		CO ₂ (96) N (3)	N (78) O (21)	CO ₂ (95) N (3)	H (78) He (20)	H (78) He (20)	H+He (15) H ₂ O, CH ₄ , NH ₃ (60)	H+He (10) H ₂ O, CH ₄ , NH ₃ (60)	
Satélites			1	2	16	18	15	8	1
Distância (UA)	0,39	0,72	1	1,52	5,2	9,55	19,19	30,11	39,53
Duração do ano dias terrestres	88	225	365 $\frac{1}{4}$	687	4.347	10.775	30.680	60.266	90.582
Rotação (dia)	58,6	-243	0,99	1,03	0,41	0,45	-0,72	0,67	-6,39
Excentricidade	0,21	0,01	0,02	0,09	0,05	0,06	0,05	0,01	0,25
Diâmetro do equador (km)	4.879	12.104	12.756	6.794	142.984	120.536	51.118	49.528	2.300
Inclinação orbital	7,00	3,39	0	1,85	1,31	2,49	0,77	1,77	17,15

$R_{\oplus}$ e $M_{\oplus}$, respectivamente, raio (6.378km) e massa ($5,98 \times 10^{21}$ t) da Terra.

As diferenças fundamentais entre planetas internos e externos podem ser atribuídas à sua evolução química primitiva. Basicamente, os últimos são gigantes gasosos, com constituição química similar à da nebulosa solar, enquanto que os internos são constituídos de material mais denso. Como será descrito adiante, tais diferenças, a partir de uma química inicial similar, se devem a um evento de alta temperatura que ocorreu numa fase precoce da evolução dos sistemas planetários, responsável pela perda de elementos voláteis pelos planetas internos.

Segundo os modelos mais aceitos (por exemplo o de Safronov, 1972), a origem do Sistema Solar remonta a uma nebulosa de gás e poeira cósmica, com composição química correspondente à abundância solar dos elementos (Tabela 1.2). A nebulosa tinha forma de um disco achatado, em lenta rotação. Nos primórdios da evolução, ocasião em que a sua estrela central, o Sol, iniciava seus processos internos de fu-

ção nuclear, a temperatura de toda a região mais interna, pouco aquém da órbita de Júpiter, permanecia elevada. Com o resfriamento gradativo, pela perda de energia por radiação, parte do gás incandescente condensou-se em partículas sólidas, iniciando o processo de acreção planetária, mediante colisões entre tais partículas, guiadas pela atração gravitacional.

Provavelmente formaram-se no estágio inicial alguns anéis com concentração maior de material sólido, separados por espaços com menor concentração. À medida que ocorreu o resfriamento, o material dos anéis foi se concentrando em corpos com dimensões da ordem de um quilômetro, ou pouco maior (**planetésimos**), que posteriormente se aglomeraram em corpos ainda maiores (protoplanetas). Finalmente, estes varreram as respectivas órbitas, atraindo para si, pela ação gravitacional, todo o material sólido que girava nas proximidades, dando origem aos planetas. Embora seja desconhecida a duração do processo de

acresção planetária, estima-se que, numa escala de tempo cósmica, ele foi muito rápido, pois a cristalização de corpos diferenciados, conforme será visto a seguir, ocorreu no máximo 200 ou 300 milhões de anos após os processos de nucleossíntese que originaram a nebulosa solar.

O processo de acresção planetária, extremamente complexo, não é totalmente conhecido, de tal modo que os modelos não explicam adequadamente todas as particularidades observadas nos planetas e satélites do Sistema Solar. Independentemente do modelo escolhido, parece que o estágio inicial da formação planetária corresponde à condensação da nebulosa em resfriamento, com os primeiros sólidos, minerais refratários aparecendo a uma temperatura da ordem de 1.700 K. O mecanismo para agregar as partículas, possivelmente relacionado com afinidade química, ainda é obscuro. Por outro lado, os protoplanetas, de dimensões grandes e com apreciável campo gravitacional, podem atrair e reter planetésimos. No citado modelo de Safronov, em cerca de 100 milhões de anos poderiam ter-se acumulado 97-98% do material que constitui hoje o planeta Terra.

As diferenças nas densidades dos planetas internos (Tabela 1.3), decrescendo na ordem Mercúrio-Terra-Vênus-Marte (e também Lua), são atribuídas à progressão do crescimento, visto que a composição química da nebulosa original foi uniforme e análoga à abundância solar dos elementos.

Finalmente, após os eventos relacionados com sua acresção, os planetas internos passaram por um estágio de fusão, condicionado pelo aumento de temperatura ocorrido em seu interior, com o intenso calor produzido pelos isótopos radioativos existentes em quantidade relevante, nas épocas mais antigas da evolução planetária. Com seu material em grande parte no estado líquido, cada planeta sofreu diferenciação química e seus elementos agregaram-se de acordo com as afinidades químicas, resultando num núcleo metálico interno, constituído essencialmente de Fe e Ni, envolto por um espesso manto de composição silicática (Cap. 5). No caso dos planetas externos, além de conterem H e He, ao lado de outros compostos voláteis em suas atmosferas exteriores, acredita-se que tenham núcleos interiores sólidos, em que predominam compostos silicáticos. Tanto no caso do episódio inicial da acresção planetária, como neste episódio posterior de diferenciação geoquímica, são cruciais os

conhecimentos obtidos pela **meteorítica**, que serão vistos a seguir.

1.5 Meteoritos

Meteoritos são fragmentos de matéria sólida provenientes do espaço. A imensa maioria, de tamanho diminuto, é destruída e volatilizada pelo atrito, por ocasião de seu ingresso na atmosfera da Terra. Os **meteoros** (estrelas cadentes) - estrias luminosas que sulcam o céu e são observadas em noites escuras e sem nuvens - são os efeitos visíveis de sua chegada. Apenas os meteoritos maiores conseguem atingir a superfície da Terra. Alguns cuja massa alcança diversas toneladas produziram crateras de impacto que vez ou outra são descobertas. Por exemplo, um meteorito com cerca de 150.000 toneladas chocou-se com a Terra há cerca de 50.000 anos, cavando o *Meteor Crater* (Arizona, E.U.A.), uma depressão com 1.200 metros de diâmetro e 180 metros de profundidade (Fig. 1.8). Um impacto meteorítico ainda maior, ocorrido em época ainda não determinada, produziu uma cratera com cerca de 3.600 metros de diâmetro nas proximidades da cidade de São Paulo, hoje, porém, preenchida por sedimentos (Cap.23).

O estudo de algumas trajetórias, quando a observação foi possível, indicou como provável região de origem dos meteoritos o anel de asteróides já referido que se situa entre as órbitas de Marte e de Júpiter (Fig. 1.7). Análises químicas de alguns meteoritos sugerem uma proveniência da Lua, e também de Marte, arrancados das superfícies desses corpos por grandes impactos.



Fig. 1.8 Meteor Crater, Arizona, EUA. Fonte: NASA.

As amostras de meteoritos conhecidas e estudadas pela **meteorítica** – o ramo da Ciência que estuda esses corpos – são da ordem de 1.700. Porém, alguns milhares de amostras adicionais estão sendo continuamente coletados por expedições na Antártica. A busca de meteoritos é grandemente facilitada na calota gelada, onde eles se concentram na superfície (juntamente com outros resíduos sólidos), com o passar do tempo, por conta da redução do volume das geleiras, causada pela ação do vento combinada com a trajetória ascendente do fluxo do gelo quando este encontra elevações topográficas.

Os meteoritos subdividem-se em classes e subclasses, de acordo com suas estruturas internas, composições químicas e mineralógicas (Tabela 1.4).

Dois aspectos da meteorítica são importantes para o entendimento da evolução primitiva do Sistema Solar: a significação dos meteoritos condriticos para o processo de acreção planetária e a significação dos meteoritos diferenciados em relação à estrutura interna dos planetas terrestres.

Os meteoritos do tipo condritico correspondem a cerca de 86% do total, em relação às quedas de fato observadas, sendo que 81% correspondem aos do tipo ordinário, enquanto que os outros 5% são os chamados condritos carbonáceos (Tabela 1.4).

Com exceção de alguns tipos de condritos carbonáceos, todos os demais tipos de condritos possuem **côndrulos**, pequenos glóbulos esféricos ou

Tabela 1.4 Classificação simplificada dos meteoritos.

Meteoritos Rochosos (95%)	Condritos (86%)	Ordinários (81%)	Características: Primitivos não diferenciados. Idade entre 4,5 e 4,6 bilhões de anos. Abundância solar (cósmica) dos elementos pesados. Possuem côndrulos, à exceção dos condritos carbonáceos tipo C1.
		Carbonáceos (5%)	Composição: Minerais silicáticos (olivinas e piroxênios) fases refratárias e material metálico (Fe e Ni). Proveniência provável: Cinturão de asteróides.
	Acondritos (9%)		Características: Diferenciados. Idade entre 4,4 e 4,6 bilhões de anos, à exceção daqueles do tipo SNC, com idade aproximada de 1 bilhão de anos.
			Composição: Heterogênea, em muitos casos similar à dos basaltos terrestres. Minerais principais: Olivina, piroxênio e plagioclásio. Proveniência provável: Corpos diferenciados do cinturão de asteróides, muitos da superfície da Lua, alguns (do tipo SNC) da superfície de Marte (Shergottitos-Nakhlitos-Chassignitos).
Meteoritos ferro-pétreos (siderólitos) (1%)	Composição: Mistura de minerais silicáticos e material metálico (Fe + Ni). Proveniência provável: Interior de corpos diferenciados do cinturão de asteróides.		
Meteoritos Metálicos (sideritos) (4%)	Composição: Mineral metálico (Fe + Ni). Proveniência provável: Interior de corpos diferenciados do cinturão de asteróides.		

elipsoidais, com diâmetros normalmente submilimétricos (0,5-1mm), e constituídos de minerais silicáticos (Fig. 1.9), principalmente olivina, piroxênios ou plagioclásios. Estes minerais, que serão vistos no Cap. 2, são os mesmos que se encontram em certos tipos de rochas terrestres, denominadas magmáticas, formadas pela cristalização de líquidos silicáticos (magmas), originados nas profundezas da Terra. Por analogia, os côndrulos devem ter-se formado, com grande probabilidade, por cristalização de pequenas gotas quentes (temperatura da ordem de 2.000°C), que vagavam no espaço em grandes quantidades, ao longo das órbitas planetárias, em ambientes virtualmente sem gravidade.

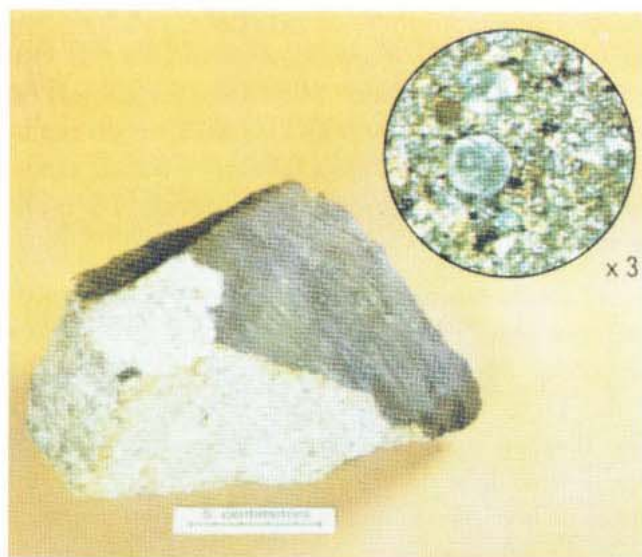


Fig. 1.9 Meteorito condrito (Barwell, Inglaterra). Fonte: IPR/7-79. British Geological Survey @ NERC. All rights reserved.

Os condritos ordinários consistem em aglomerações de côndrulos. Nos interstícios entre os côndrulos, aparecem materiais metálicos, quase sempre ligas de ferro e níquel, ou sulfetos desses elementos, fazendo com que o conjunto tenha uma composição química global muito similar àquela preconizada para a própria nebulosa solar para quase todos os elementos, com exceção de H, He, e alguns outros entre os mais voláteis. Em consequência, tais meteoritos condriticos (e entre estes os condritos carbonáceos do tipo C1) são considerados os corpos mais primitivos do Sistema Solar diretamente acessíveis para estudo científico. A interpretação de sua origem é a de que eles são fragmentos de corpos parentais maiores, mais ou menos homogêneos em composição, que existiam como planetesimos na região do espaço entre Marte e Júpiter, que não chegaram a sofrer diferenciação química, permanecendo portanto sem transformações importantes em suas estruturas internas. A figura 1.10 ilustra a formação e evolução primitiva dos corpos parentais dos meteoritos.

A própria existência dos côndrulos indica que o material formou-se durante o resfriamento e a correspondente condensação da nebulosa solar, portanto, antes dos eventos principais de acreção planetária. Mais ainda, indica que houve um estágio de alta temperatura, seguramente acima de 1.700°C e provavelmente próximo de 2.000°C, pelo menos em toda a parte interna do Sistema Solar, incluindo o anel dos asteróides. Considera-se que este evento de alta temperatura, ocorrido numa fase precoce da evolução dos

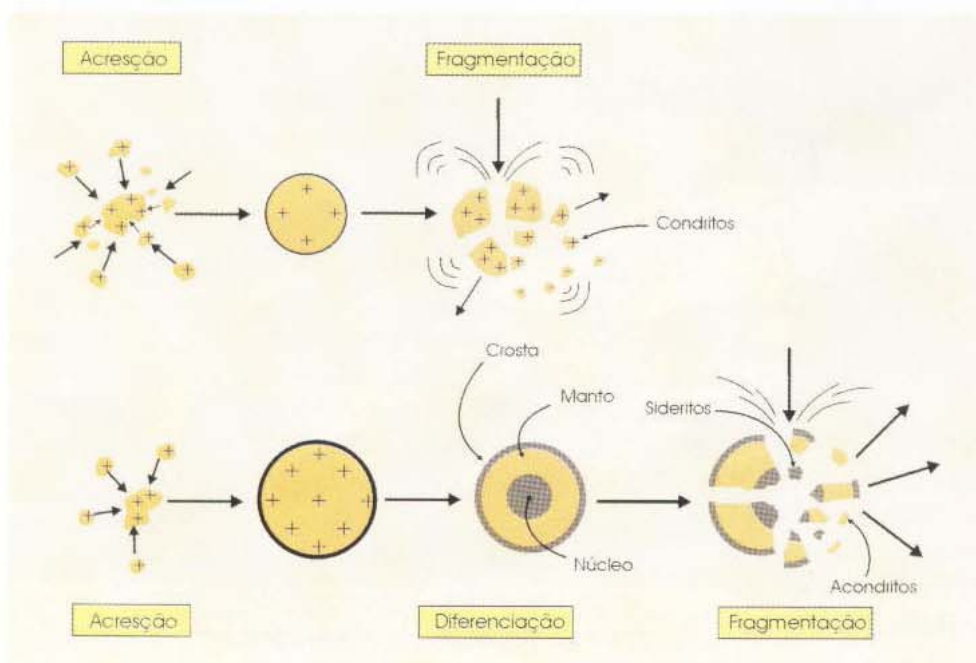


Fig. 1.10 Esquema simplificado da origem dos corpos parentais dos meteoritos. Grandes impactos no espaço causaram a fragmentação desses corpos parentais, originando diferentes tipos de meteoritos.

sistemas planetários, tenha sido o responsável pela perda dos elementos mais voláteis, e principalmente H e He, por parte do material que viria mais tarde a constituir os planetas internos, seus satélites e os asteróides.

Os condritos carbonáceos do tipo C1 contêm minerais hidratados e compostos orgânicos, formados em temperaturas relativamente baixas, e não possuem cóndrulos. Além disso, apresentam uma composição química muito próxima da abundância solar dos elementos, à exceção dos elementos gasosos e dos compostos mais voláteis. Assim, este tipo é considerado o mais primitivo e menos diferenciado dos produtos condensados da matéria planetária inicial. Suas feições particulares sugerem que seus corpos parentais foram menos aquecidos do que os que deram origem aos demais condritos e portanto estariam situados a maiores distâncias do Sol, na região orbital entre Marte e Júpiter.

Os **acondritos**, **siderólitos** e **sideritos** (Tabela 1.4) perfazem cerca de 14% das quedas recuperadas. A Fig. 1.11 mostra a estrutura interna típica de um siderito, formada pelo intercrescimento de suas fases minerais na época da sua formação, ainda no interior do núcleo do corpo parental.

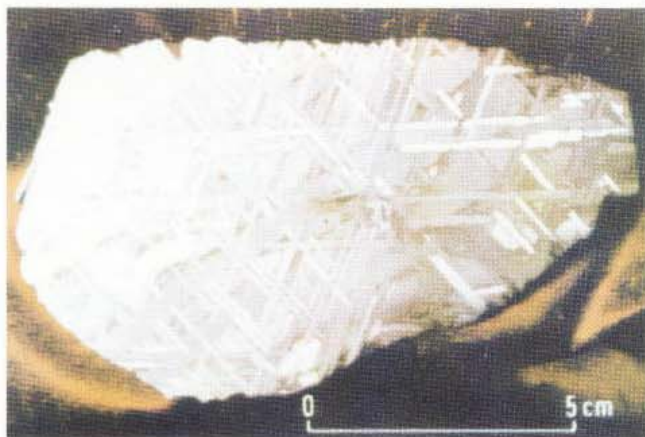


Fig. 1.11 Siderito de Coopertown, EUA. Face polida mostrando a estrutura típica de Widmanstätten, produzida pelo intercrescimento de lamelas de dois minerais diferentes, ambos constituídos de Fe e Ni. Siderito de Coopertown, EUA. Fonte: IPR/7-79. British Geological Survey @ NERC. All rights reserved.

Esses meteoritos não-condríticos correspondem a diversas categorias de sistemas químicos diferentes, formados em processos maiores de diferenciação geoquímica, no interior de corpos parentais maiores do que aqueles que deram origem aos condritos e que atingiram dimensões superiores aos limites críticos para

a ocorrência de fusão interna. De certa forma, trata-se de sistemas químicos complementares em relação ao “modelo condrítico”.

No âmbito da evolução dos corpos parentais dos meteoritos, até a sua fragmentação final (Fig. 1.10), o processo acrecionário inicial seria similar, e no caso do corpo parental não atingir grandes dimensões, a sua fragmentação produziria apenas condritos. Para os corpos maiores, a energia dos impactos, aliada ao calor produzido pelas desintegrações de determinados isótopos radioativos existentes no material, elevariam a temperatura e produziriam a fusão do material, com a conseqüente separação das fases silicáticas em relação às fases metálicas. Os corpos parentais, tanto diferenciados como não diferenciados, colidiram entre si, fragmentando-se e produzindo objetos menores, como os atuais asteróides. Muitos dos fragmentos resultantes das inúmeras colisões acabariam cruzando eventualmente com a órbita da Terra e seriam capturados por ela, como meteoritos, devido à atração gravitacional.

O estudo dos meteoritos permite o estabelecimento, com certa precisão, da cronologia dos eventos ocorridos durante a evolução primitiva do Sistema Solar. Determinações de idade, obtidas diretamente nos diversos tipos de meteoritos, têm revelado uma quase totalidade de valores entre 4.600 e 4.400 milhões de anos, sendo que há determinações de grande precisão em certos meteoritos rochosos (portanto diferenciados) por volta de 4.560 milhões de anos. A principal exceção refere-se ao grupo de meteoritos do tipo SNC (Shergottitos-Nakhlitos-Chassignitos), cujas idades de cristalização são da ordem de 1.000 milhões de anos. Estas idades mais jovens e a natureza e mineralogia basáltica (silicatos ferro-magnesianos principalmente) destes meteoritos apóiam sua proveniência de Marte.

Com base na idade dos meteoritos diferenciados por volta de 4.560 milhões de anos, evidenciou-se que naquela época já tinha ocorrido acúmulo de material em corpos parentais com dimensão suficiente para ensejar diferenciação geoquímica. Como corolário, os planetas terrestres também devem ter sido formados de acordo com este cronograma. Segundo o modelo já mencionado de Safronov, a acumulação de 97-98% do material do planeta Terra teria ocorrido em cerca de 100 milhões de anos. Mais ainda, a existência das assim chamadas “radioatividades extintas” permite colocar um limite de idade para aqueles eventos de

nucleossíntese que produziram, no interior de uma supernova que explodiu, a grande parte dos elementos do Sistema Solar. Radioatividades extintas referem-se a certos isótopos, como o ^{127}Xe , que se forma a partir da desintegração do isótopo radioativo ^{127}I , de meia-vida curta (Cap. 15), da ordem de 12 milhões de anos. Este isótopo formado no interior da estrela, foi lançado no espaço e produziu Xe até o seu desaparecimento, nas primeiras duas ou três centenas de milhões de anos a partir do evento de sua formação. O fato de ^{127}Xe em excesso ter sido encontrado e medido em muitos meteoritos indica que o isótopo 127 do Iodo esteve presente no sistema durante os processos de acreção e diferenciação. A medida da quantidade de xenônio formado em excesso permitiu fixar um limite, da ordem de 200 milhões de anos, para o processo de nucleossíntese que formou a grande maioria dos elementos que hoje constituem o Sol e seus corpos planetários. Estes, por sua vez, descendem da explosão de uma supernova ocorrida por volta de 4.800 milhões de anos atrás.

1.6 Planetologia Comparada

Com o advento da era espacial, a partir do final dos anos 50, mais de 80 espaçonaves norte-americanas e da ex-União Soviética efetuaram missões exploratórias, trazendo informações dos planetas e outros objetos do Sistema Solar de uma maneira sem precedentes. Assim, o estudo dos planetas teve enor-

me impulso e levou ao estabelecimento da planetologia comparada, um ramo recente das ciências geológicas que busca elucidar condições e processos que ocorreram em determinados períodos da história da Terra, por meio das observações nos planetas e satélites que são nossos vizinhos.

Para a Terra, assim como para Mercúrio, Vênus e Marte, a existência de um núcleo denso foi demonstrada há muito tempo, em virtude dos dados observados sobre seus momentos de inércia, bem como as determinações, pela Astronomia, de suas densidades médias. Como os planetas telúricos tiveram evolução similar à dos corpos parentais dos meteoritos diferenciados, podemos concluir que eles têm um núcleo metálico, análogo em composição aos sideritos, e um manto silicático, análogo em composição a certos acondritos. No caso da Terra, a separação entre esses dois sistemas quimicamente muito diferentes é caracterizada por uma clara descontinuidade nas propriedades sísmicas, situada a uma profundidade aproximada de 2.885 km (Cap. 4).

As missões Apollo e Luna efetuaram valiosas observações na Lua e coletaram mais de 380 quilos de amostras lunares (Fig. 1.12). Do mesmo modo, Mercúrio foi estudado pelas sondas espaciais Mariner; Vênus pelas sondas Venera e Magellan, e o planeta Marte pelas sondas *Mars*, Mariner, Viking, Mars Pathfinder, e Mars Global Surveyor. As sondas Pioneer e Voyager foram lançadas para observações à distância dos diversos planetas e sa-

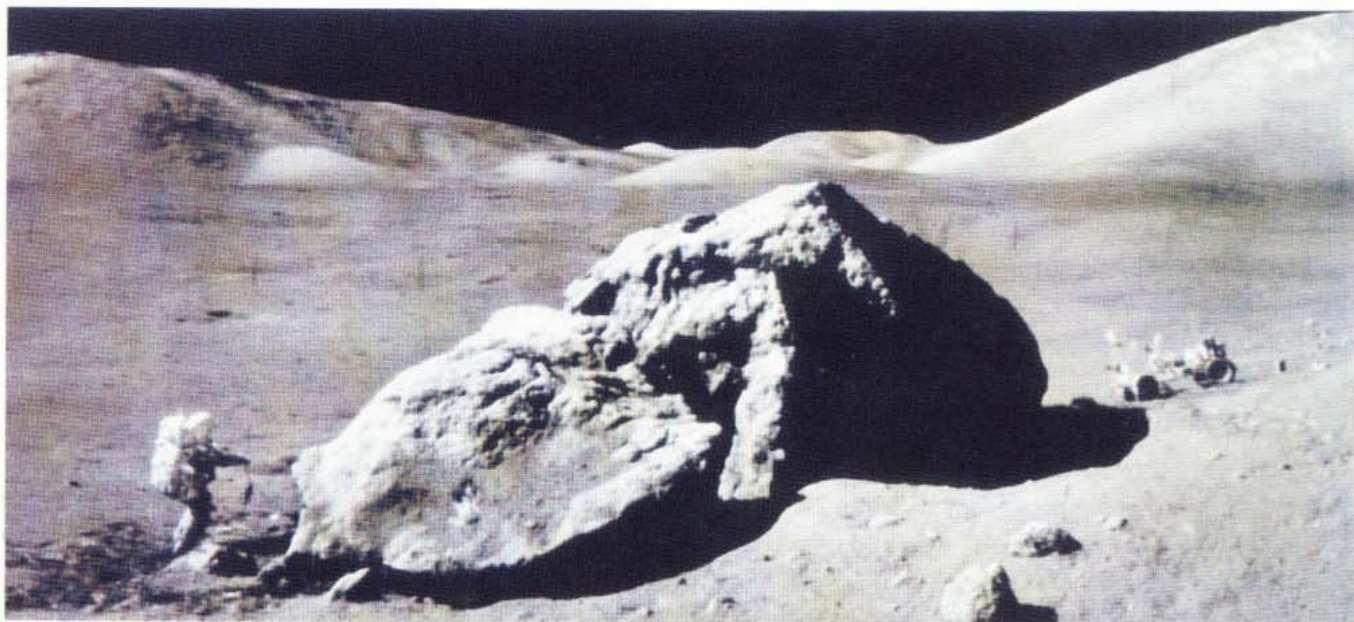


Fig. 1.12 Astronauta da missão Apollo 17, examinando uma grande rocha lunar nas proximidades do sítio de pouso da nave espacial, em dezembro de 1972. Fonte: NASA.

téites externos, tendo sido produzidas fotografias e imagens de enorme valor científico. Outra iniciativa estratégica é a missão *Galileo*, um programa científico dos mais ambiciosos, em que a nave espacial, lançada em 1989, chegou até Júpiter em 1995, e desde então está realizando um *tour* fantástico daquele planeta e de seus satélites principais, destacando uma missão suicida de uma de suas sondas, que mergulhou na atmosfera de Júpiter, colhendo dados preciosos sobre sua constituição e sua dinâmica.

Resumiremos a seguir algumas características dos planetas e dos principais satélites do Sistema Solar, com ênfase nos que têm especial importância para a elucidação de determinados ambientes físico-químicos e processos evolutivos relevantes para a história do nosso planeta.

1.6.1 Planetas internos

Terra - O terceiro planeta do Sistema Solar apresenta massa aproximada de 6×10^{29} g e densidade de $5,52 \text{ g/cm}^3$. O raio equatorial terrestre é de 6.378,2 km e o seu volume $1,083 \times 10^{12} \text{ km}^3$. Embora tenha perdido seus elementos voláteis na fase de acreção do Sistema Solar, a Terra apresenta uma atmosfera secundária, formada por emissões gasosas durante toda a história do planeta, e constituída principalmente por nitrogênio, oxigênio e argônio. A temperatura de sua superfície é suficientemente baixa para permitir a existência de água líquida, bem como de vapor de água na atmosfera, responsável pelo efeito estufa regulador da temperatura, que permite a existência da biosfera. Por causa dos envoltórios fluidos que a recobrem, atmosfera e hidrosfera, a Terra quando vista do espaço assume coloração azulada, conforme simbolizado pela fotomontagem introdutória deste capítulo. Esta visão magnífica foi relatada por Yuri Gagarin, o primeiro astronauta a participar de uma missão aeroespacial.

A característica principal do planeta Terra é seu conjunto de condições únicas e extraordinárias que favorecem a existência e a estabilidade de muitas formas de vida, sendo que evidências de vida bacteriana abundante foram já encontradas em rochas com idade de 3.500 milhões de anos.

A Terra possui importantes fontes de calor em seu interior, que fornecem energia para as atividades de sua dinâmica interna e condicionam a formação de magmas e as demais manifestações da assim chamada tectônica global (Cap. 6). Este processo conjuga-se aos movimentos de grandes placas rígidas que constituem a litosfera, a capa mais externa do planeta, que por sua vez situa-se em todo o globo acima de uma camada mais plástica, a astenosfera.

Ao mesmo tempo, a superfície terrestre recebe energia do Sol, através da radiação solar incidente, que produz os movimentos na atmosfera e nos oceanos do planeta. Estas últimas atividades são as que provocam profundas transformações na superfície da Terra, modificando-a continuamente. Justificam assim o fato de que quaisquer feições primitivas de sua superfície, como por exemplo crateras de impacto meteorítico, tenham sido fortemente obscurecidas ou totalmente apagadas ao longo da sua história.

A Lua, o satélite da Terra, apresenta 1,25% da massa do planeta a que se relaciona, sendo neste particular um dos maiores satélites do Sistema Solar. Tem um diâmetro de 3.480 km e densidade de $3,3 \text{ g/cm}^3$, portanto muito menor do que a da Terra. Não detém atmosfera.

As feições geológicas maiores da Lua são visíveis a olho nu (Fig. 1.13). Trata-se de áreas claras que circundam áreas mais escuras de contorno mais ou menos circular, conhecidas como mares ("maria"). As informações obtidas nas missões espaciais à Lua indicaram que as primeiras são regiões de terras altas (*highlands*), de relevo irregular, e apresentando grande quantidade de crateras de impacto, enquanto que as segundas são vastas planícies, com muito menor quantidade de crateras.



Fig. 1.13 Principais feições observáveis na superfície lunar a partir da Terra, destacando-se as planícies, os mares (áreas escuras) e as terras altas de relevo irregular com grande quantidade de crateras. Fonte: Observatório Lick, NASA.

As amostras de material lunar coletadas pelas missões Apollo permitiram esclarecer que nas terras altas predominam rochas claras, pouco comuns na Terra e denominadas *anortositos*, constituídas essencialmente de plagioclásios (silicatos de Na e Ca) que são por sua vez muito comuns na Terra. Determinações de idade obtidas nestas rochas mostraram-se sempre acima de 4.000 milhões de anos. Alguns valores de idade resultaram próximos de 4.600 milhões de anos, da mesma ordem das idades obtidas em meteoritos. Estas idades indicam que os materiais lunares foram também formados nos primórdios da evolução do Sistema Solar.

Por sua vez, as amostras coletadas das regiões baixas (nos *maria*) revelaram uma composição basáltica, material de origem vulcânica muito comum na Terra. Suas idades resultaram em geral mais novas do que as das rochas anortosíticas, mas de qualquer forma muito antigas, da ordem de 3.800 milhões de anos. As datações mais jovens obtidas nas rochas basálticas lunares foram da ordem de 3.200 milhões de anos.

A análise das estruturas de impacto visíveis na superfície da Lua demonstra que o satélite foi submetido a um violento bombardeio por planetesimais e asteróides de todos os tamanhos, desde sua fase embrionária. As crateras maiores têm diâmetros superiores a 1.000 km (como por exemplo os denominados *Mare Imbrium*, *Mare Tranquilitatis*, ou a Bacia Oriental, no lado distante da Lua), mas existem muitas outras, de todos os tamanhos (Fig. 1.14).

A origem do sistema Terra-Lua é assunto ainda controverso, tendo em vista as muitas semelhanças e diferenças de nosso satélite em relação à Terra. O modelo mais aceito atualmente (Fig. 1.15) postula um impacto de um corpo de dimensões pouco maiores que Marte, durante os estágios finais da acreção planetária, ocasião em que a Terra já tinha praticamente seu tamanho atual, e já estava diferenciada, com núcleo metálico e manto silicático.

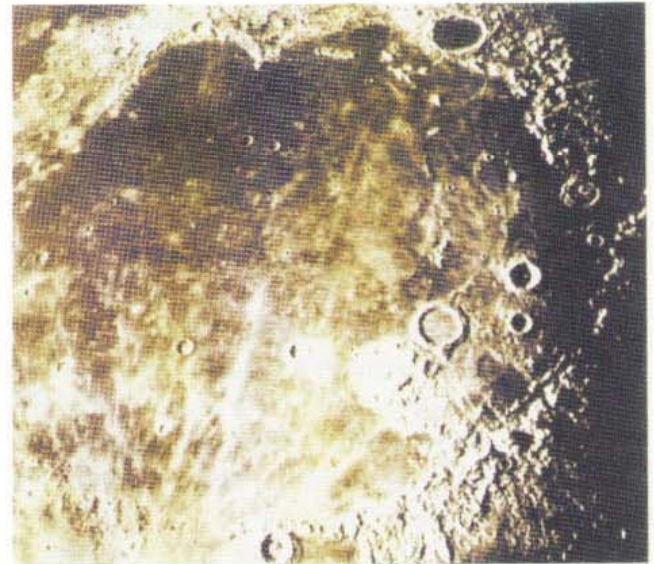


Fig. 1.14 Imagem do Mare Imbrium, uma cratera de impacto gigantesca, preenchida por lava, com cerca de 1.000 km de diâmetro. Notar o grande número de crateras menores e mais jovens também presentes. Fonte: NASA.

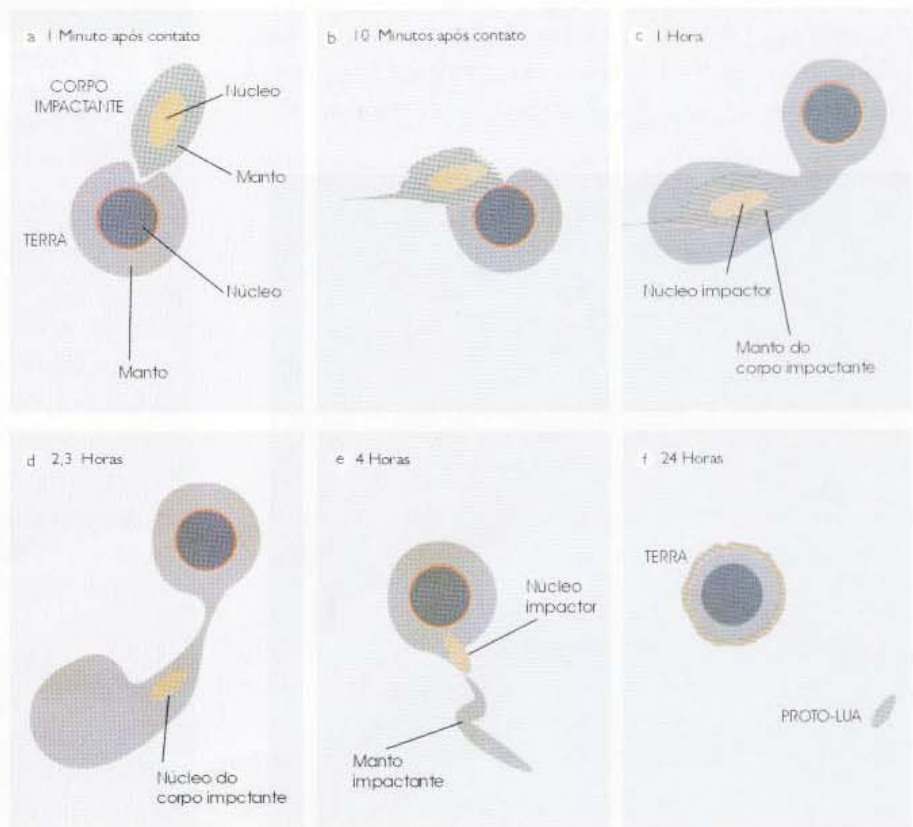


Fig. 1.15 Sistema Terra-Lua - Simulação de computador sobre a origem da Lua, considerando o impacto oblíquo de um objeto com cerca de 0,14 da massa terrestre, com velocidade de 5 km/s. Ambos os corpos já estariam diferenciados em núcleo metálico e manto silicático. Logo após a colisão, o corpo impactante e parte do manto terrestre foram despedaçados, e muitos compostos voláteis foram vaporizados. Em seguida, grande parte do manto do objeto que colidiu teria sido ejetado para uma situação orbital e coalesceria rapidamente formando uma Lua parcial ou totalmente fundida. Grande parte do material do núcleo do corpo impactante, mais pesado, teria sido incorporado à Terra.

Mercúrio - é o planeta mais interno do Sistema Solar. Sua massa é apenas 5,5% da Terra, mas sua densidade é apenas pouco inferior à do nosso planeta. Seu núcleo metálico é, portanto, proporcionalmente muito maior que o terrestre.

Mercúrio tornou-se geologicamente inativo logo após ter sido formado. Praticamente não tem atmosfera, e por causa disso sua superfície não sofreu grandes transformações, sendo portanto muito antiga. Observações da sonda Mariner 10 revelaram que a sua superfície é árida e preserva grande quantidade de crateras de impacto resultantes do bombardeio ocorrido nos primórdios da evolução do Sistema Solar (Fig. 1.16), como na Lua.

Vênus - é o planeta que apresenta maior semelhança com a Terra, em tamanho, em peso, na sua herança de elementos químicos, e sua massa equivale a 81,5% da massa desta. Sua aparência externa, observada ao telescópio, é obscurecida por nuvens, refletindo a densa atmosfera, que esconde suas feições topográficas. Contudo, diversas sondas, a exemplo das soviéticas Venera 9 e 10, ou a norte-americana Magellan, nas décadas de 70 e 80, lograram obter imagens de

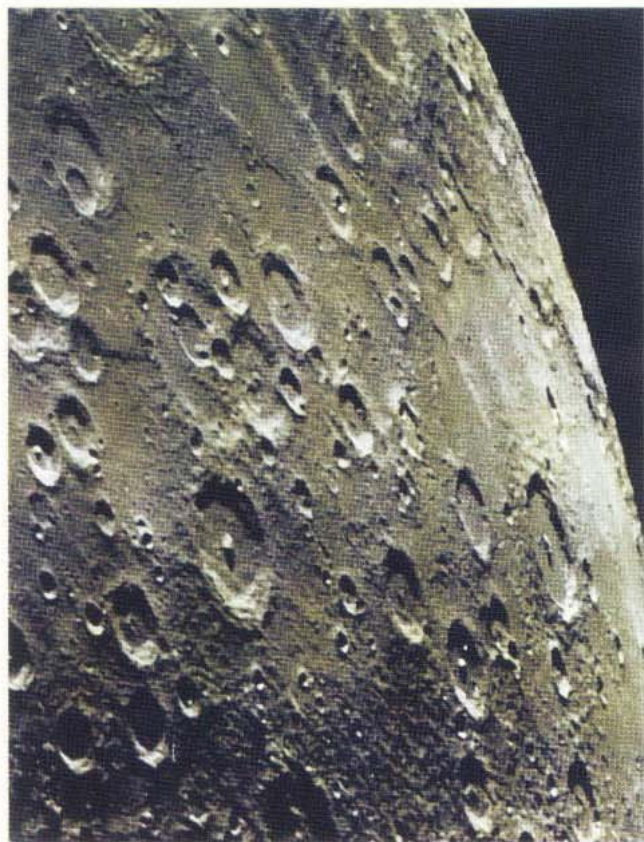


Fig. 1.16 Superfície árida de Mercúrio, mostrando grande quantidade de crateras de impacto de tamanhos diversos. Fonte: NASA.

radar de sua superfície (Fig. 1.17). Algumas dessas missões chegaram a pousar no planeta, e as análises obtidas revelaram rochas com composição basáltica similar à de rochas terrestres.



Fig. 1.17 Feições morfológicas da superfície de Vênus em mosaico de radar obtido pela missão Magellan. Observar estruturas circulares gigantes e a faixa mais clara de planaltos elevados. Fonte: NASA/JPL.

O relevo do planeta é menos variado que o da Terra. São observadas ondulações moderadas da superfície em cerca de 60% da área, terras baixas em cerca de 30%, e alguns planaltos elevados (*Terra Ishtar* e *Terra Aphrodite*), que foram interpretados como massas rochosas “continentais”. Feições similares a vulcões e estruturas circulares gigantes (Fig. 1.17 parecidas com grandes estruturas vulcânicas de colapso existentes na Terra foram observadas. Além disso, foram identificados sistemas simétricos de elevações lineares de grande extensão, interpretados como análogos aos sistemas de dorsais existentes nos oceanos terrestres (Cap. 17), e também elevações topográficas na *Terra Ishtar* interpretadas como cadeias montanhosas produzidas por colisão de massas continentais. Grandes crateras de impacto foram identificadas, sugerindo que certas áreas do planeta são geologicamente antigas.

A atmosfera de Vênus, secundária como a da Terra, é formada basicamente por CO_2 e quantidades menores de N , SO_2 e outros gases. A pressão atmosférica na superfície do planeta é de cerca de 92 bars, e a enorme quantidade de gás carbônico existente gera um efeito estufa gigantesco, elevando a temperatura da superfície a quase 500°C .

Por causa das similaridades de tamanho e composição, Vênus deveria ter regime térmico similar ao da Terra, sugerindo, portanto, a existência de uma estruturação interna. Entretanto, evidências diretas de uma tectônica global do tipo terrestre não estão comprovadas. Ao mesmo tempo, a elevada temperatura superficial do planeta sugere que a sua litosfera seria menos espessa e mais flutuante, impedindo ou dificultando processos de subducção para o manto interior do planeta como os que ocorrem na Terra (Cap. 6). Além disso, a grande quantidade de vulcões apontaria à existência de regiões com elevada produção de calor (*hot spots*) (Caps. 6 e 17) no manto de Vênus, as quais poderiam refletir o produto final de uma dinâmica de dissipação superficial do calor interno do planeta.

Marte - O quarto planeta do Sistema Solar é pequeno, com massa total de cerca de 11% daquela da Terra. As numerosas sondas espaciais, mas em especial as missões recentes das sondas Pathfinder e Global Surveyor, trouxeram enorme quantidade de dados muito valiosos acerca do “planeta vermelho” (Fig. 1.18).



Fig. 1.18 Marte visto do espaço. Destacam-se 3 vulcões como manchas escuras circulares no setor ocidental, bem como uma estrutura enorme que cruza o planeta em sua porção equatorial. Trata-se de um cânion com 4.500 km de extensão, denominado Valles Marineris, semelhante aos vales de afundamento terrestres e possivelmente formado por processos geológicos internos de Marte. Fonte: NASA/JPL.

Marte contém uma atmosfera tênue (pressão atmosférica na superfície de apenas 0,007 bar), consistindo principalmente de CO_2 , além de quantidades diminutas de nitrogênio e argônio. Os processos geológicos superficiais do planeta são dominados pela ação do vento, tendo sido observados enormes campos de dunas, constantemente modificados por tempestades de areia. Marte também apresenta calotas polares que incluem gelo, além de gelo seco.

Há uma grande diferença entre os dois hemisférios marcianos, sendo o meridional de relevo mais elevado e mais acidentado, enquanto que o setentrional é formado por uma extensa planície pontilhada por enormes vulcões, entre os quais o Monte Olimpus, com 26 km de altura sobre a planície circundante (Fig. 1.19). Este é o maior vulcão conhecido do Sistema Solar. O hemisfério sul é repleto de crateras de impacto, e o panorama assemelha-se às terras altas lunares, de modo que a superfície do hemisfério sul deve ser analogamente muito velha. Por outro lado, a superfície do hemisfério norte possui número menor de crateras, e sua superfície deve ser relativamente mais jovem, embora ainda antiga se comparada com a de Vênus ou da Terra. Os edifícios vulcânicos e seus derames de lava praticamente não possuem crateras, devendo ser geologicamente mais jovens. Quanto à composição química das lavas marcianas, devem predominar variedades basálticas ou variedades derivadas de magmas basálticos, como foi revelado pelas análises efetuadas durante a missão Pathfinder e também aquelas realizadas nos meteoritos SNC, já mencionados, cujas composições químicas mostram-se semelhantes às dos basaltos terrestres.

A litosfera de Marte deve ser muito espessa, no mínimo de 150 a 200 km, por ser capaz de suportar o crescimento de estruturas vulcânicas tão altas como a do Monte Olimpus, numa posição fixa. Provavelmente o planeta teve nos seus primórdios uma evolução geológica interna importante, que deve ter cessado há muito tempo, visto que, pelo seu pequeno tamanho, muito do calor interno produzido teria escapado diretamente para o espaço. Interpretações com base em determinações de idade dos meteoritos SNC sugerem que as rochas vulcânicas de Marte teriam cerca de 1.000 milhões de anos, após o quê teria terminado a fase de vulcanismo ativo no planeta. Presentemente, não se observam evidências de atividades geológicas em Marte, com as feições indicando que o planeta provavelmente nunca teve uma tectônica global pare-

cida com a que se desenvolve até hoje na Terra. Todavia, feições morfológicas lineares típicas de Marte, tais como o já mencionado *Valles Marineris* (Fig. 1.18), são semelhantes a certas estruturas terrestres de mesma magnitude, como os vales de afundamento da África oriental, ou a estrutura geológica que condicionou o aparecimento do Mar Vermelho.

Em vários lugares, a superfície de Marte aparece como dissecada e modificada por uma combinação de erosão aquosa e movimentos de massa (Fig. 1.20). Tendo em vista que a superfície é muito fria, com temperaturas normalmente abaixo de 0°C, a água somente poderia atuar como agente erosivo em episódios “quentes” de curta duração, como em decorrência de eventuais impactos meteoríticos. Em tais casos ocorreria a liquefação do gelo que deve existir de modo permanente na sub-superfície de Marte, em materiais porosos ou fraturados, em situação similar à dos terrenos congelados que existem na Terra nas regiões de altas latitudes.

Desde as primeiras observações de Marte, passando pelos relatos de astrônomos do século XVIII, como o italiano Schiaparelli e o norte-americano C. Lowell, que descreveram os famosos “canais”, sempre houve especulações sobre possíveis habitantes, ou sobre a existência de formas de vida naquele planeta. Em 1996 um grupo de pesquisadores da NASA relatou ter encontrado possíveis evidências de atividade biogênica no shergottito ALH84001, um dos constituintes do

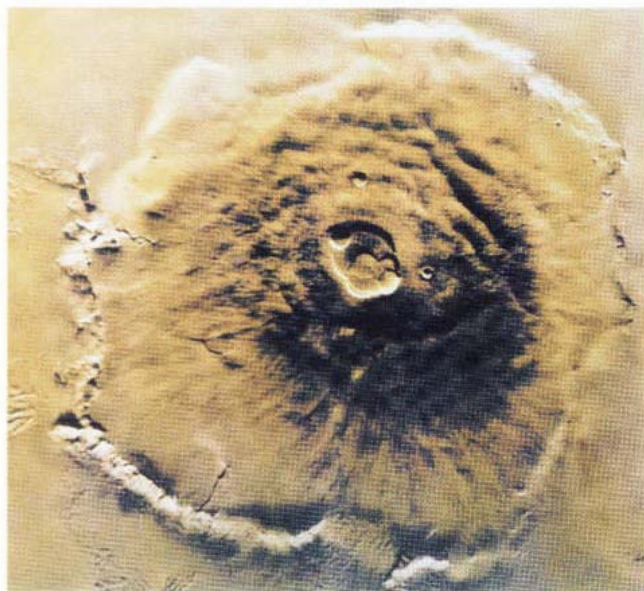


Fig. 1.19 Monte Olympus, o maior vulcão conhecido do Sistema Solar, cujo tamanho é três vezes o do monte Everest. Fonte: NASA/JPL.



Fig. 1.20 A superfície de Marte tal como foi vista pela sonda Pathfinder, na região de seu pouso, na confluência dos vales Ares e Tiu. Trata-se de uma enorme planície de inundação, formada numa época em que ocorreram grandes movimentos de material transportado em meio aquoso. Fonte: NASA.

pequeno grupo de meteoritos SNC que se considera proveniente de Marte. Tais evidências, ainda hoje debatidas pela Ciência, consistem de hidrocarbonetos aromáticos encontrados em superfícies frescas de fraturas do meteorito e formações globulares carbonáticas que se assemelham, em textura e dimensão, a alguns precipitados carbonáticos terrestres formados por ação bacteriana.

1.6.2 Planetas externos: os gigantes gasosos

Júpiter, Saturno, Urano e Netuno são muito diferentes dos planetas internos descritos até aqui e correspondem a enormes esferas de gás comprimido, de baixa densidade. Júpiter e Saturno são gigantes gasosos formados principalmente por H e He, enquanto que Urano e Netuno possuem cerca de 10-20% desses elementos, mas suas massas compreendem também sólidos, incluindo gelo e materiais rochosos. De qualquer forma, nos quatro planetas é possível observar diretamente apenas as partes mais externas de suas atmosferas e especular a respeito da natureza e das condições de seus interiores, onde as pressões existentes são tão grandes que desconhecemos a física que nelas prevalece.

A missão Voyager 2 foi a que trouxe maior número de informações e magníficas visões de seu “grande tour” pelo Sistema Solar na década de 80. Entretanto, a missão Galileo, iniciada em 1989 e que chegou a Júpiter em 1995, obteve a maior quantidade de informações sobre este planeta gigante, seus anéis e seus satélites.

Júpiter (Fig. 1.21), pelo seu tamanho descomunal, pode ser considerado uma estrela que falhou. Possivelmente, nos primórdios de sua evolução, ele brilhou tal como uma estrela, porém com luminosidade muito fraca. Se Júpiter tivesse massa muito maior, o Sistema Solar teria sido uma estrela dupla, como há muitas no Universo, e provavelmente a Terra e outros planetas não teriam sido formados. Júpiter possui alguns anéis e diversos satélites, todos diferentes entre si e formados por material sólido. Os maiores, denominados satélites galileanos, são Europa, Ganimedes, Callisto e Io (Fig. 1.21). Este último satélite tem temperatura interna extremamente alta, de tal modo que produz continuamente violentas e gigantescas erupções vulcânicas em sua superfície (Fig. 1.22). Trata-se do mais intenso vulcanismo do nosso Sistema Solar.

A energia interna de Júpiter é ainda muito elevada, provavelmente suficiente para manter o material de seu interior inteiramente líquido. Considera-se que as camadas externas do planeta contenham essencialmente H molecular, H_2 , enquanto que nas internas predomina H metálico, líquido. Júpiter teria ainda um núcleo relativamente pequeno de material fundido, possivelmente silicatos.

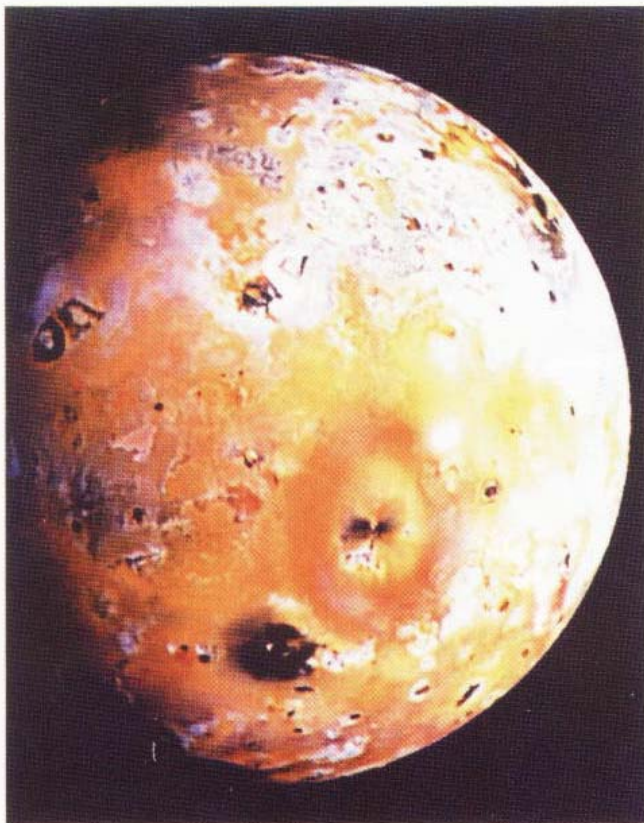


Fig. 1.22 Io, um dos satélites de Júpiter, cuja superfície é coberta de vulcões ativos (por exemplo na parte centro sul do satélite), que expõem enxofre líquido e compostos sulfurosos. Fonte: NASA.



Fig. 1.21 Mosaico mostrando Júpiter e quatro de seus satélites (Ganimede, Callisto, Europa e Io), como observado pela nave Voyager 1. Fonte: NASA.

Pouco se conhece acerca do interior de Saturno (Fig. 1.23), que deve compartilhar muitas das propriedades de Júpiter. Ainda menos se conhece sobre Urano e Netuno, que pelas suas densidades médias devem ter núcleos de material denso. Os modelos propostos para suas estruturas internas preconizam um núcleo rochoso, coberto por um “manto” de água líquida, metano, amônia e outros compostos, formando um oceano com milhares de quilômetros de espessura. Este oceano seria recoberto por uma atmosfera muito densa formada por H e He .

1.6.3 Cinturão de asteróides

Entre as órbitas de Marte e Júpiter ocorre o cinturão de asteróides, constituído de incontáveis corpos planetários de tamanhos diversos. Como foi mencionado anteriormente, a grande maioria dos meteoritos que continuamente caem na superfície da Terra provém desse cinturão. É provável que os asteróides não puderam se reunir num único planeta, na época de acreção, devido às perturbações de natureza gravitacional causadas pela proximidade de Júpiter.

O maior asteróide conhecido é Ceres com diâmetro de 974 km. Além deste, conhecem-se mais seis asteróides com diâmetros superiores a 300 km, cerca de duzentos com diâmetro superior a 100 km, por volta de 2.000 com diâmetro superior a 10 km, e as-

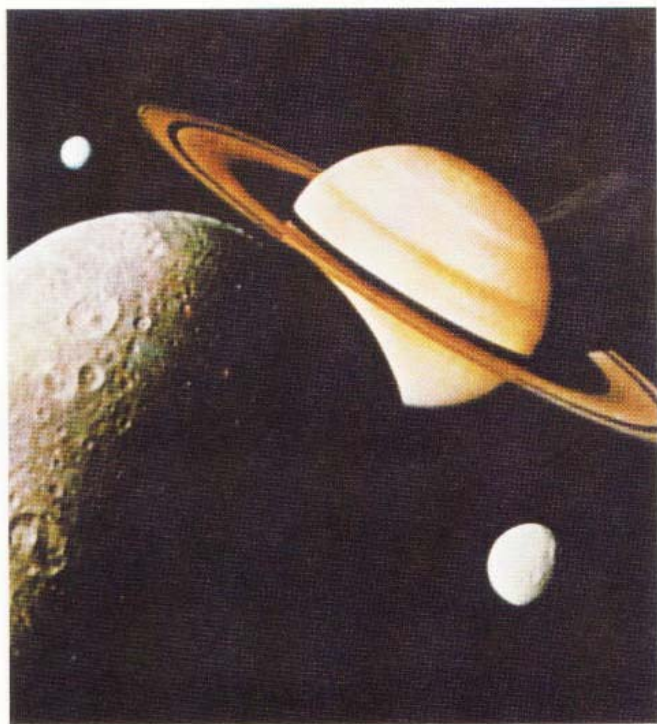


Fig. 1.23 Mosaico mostrando Saturno e seus satélites Dione, Rhea e Tethys. Os sete anéis deste planeta são formados essencialmente de gelo e poeira, em partículas e fragmentos pequenos. Fonte: NASA/.

sim por diante. Cerca de 75% desses corpos consistem de silicatos de Fe e Mg, material similar ao dos meteoritos condriticos. Cerca de 15% apresentam-se como misturas de material silicático e material metálico (Fe-Ni), podendo ser análogos aos siderólitos, e cerca de 5% parecem ser totalmente metálicos, assemelhando-se aos sideritos. Os 5% restantes podem representar outros tipos de meteoritos. A massa total dos asteróides conhecidos corresponde a cerca de 2% da massa da Lua.

1.6.4 Cometas

Cometas são constituídos predominantemente por material gasoso (Fig. 1.24), que representa a matéria primordial da nebulosa solar. Acredita-se que durante o processo de acreção planetária, na fase de formação de planetésimos, os cometas também foram formados numa região muito além do anel planetário mais externo. Tais corpos, de dimensões variáveis (da ordem de 1 km de diâmetro ou menos), não puderam originar protoplanetas, por estarem muito afastados entre si. Durante os 4,6 bilhões de anos de nosso Sistema Solar, as ór-

bitas dos cometas foram perturbadas pela ação gravitacional das estrelas mais próximas, e agora eles estariam orientados ao acaso nas proximidades do plano principal do sistema. A **nuvem de Oort** deve conter possivelmente muitos bilhões de cometas.

Cerca de 750 cometas são conhecidos, como por exemplo o de *Halley*, de período curto, cuja órbita o faz se aproximar da Terra a cada 75-76 anos, como ocorreu em 1986, ou o *Schumacher-Levy*, que colidiu espetacularmente com o planeta Júpiter em julho de 1995. A constituição dos cometas inclui compostos voláteis congelados, tais como H_2O , H_2CO , C, CO, CO_2 , H, OH, CH, O, S, NH, NH_3 , HCN, N_2 , e muitos outros, inclusive metais como Na, K, Al, Mg, Si, Cr, Mn, Fe etc. Quando cometas são trazidos para perto da órbita da Terra, seus gases são vaporizados e ionizados pela radiação solar, e o conjunto toma a forma típica de um núcleo (*coma*) e uma cauda apontando para o lado oposto do Sol.



Fig. 1.24 Cometa de Hyakutake, descoberto em 30 de janeiro de 1996. Fonte: NASA.

1.7 Perspectivas do Estudo do Universo

A aventura extraterrestre da humanidade está apenas começando, na busca de respostas para aquelas questões fundamentais formuladas no início deste capítulo. A todo momento, novas observações e novos dados científicos são adicionados, e muitos deles causam surpresas inesperadas que modificam teorias e idéias estabelecidas. É desta forma que a Ciência progride.

Para o conhecimento do Sistema Solar, as últimas quatro décadas do século XX foram cruciais. Contudo, a exploração dos planetas, satélites e demais objetos associados está apenas começando. A sonda Galileo ainda continua estudando Júpiter, e são apenas do final de 1999 as imagens fantásticas do satélite Io, com um de seus vulcões expelindo lava extremamente quente, a mais de 1 km de altura, numa escala maior do que qualquer das erupções famosas do Havaí. Para a primeira década do século XXI estão programadas outras missões, com ênfase para o planeta Marte, ao redor do qual ainda permanece o *Global Surveyor*. Planeja-se coletar amostras de gases, solos e rochas, entre outras coisas, para buscar evidências inequívocas de vida, na sequência das indicações fornecidas pelo estudo do meteorito ALH84001. Pretende-se também obter um melhor conhecimento de asteroídes e cometas, talvez os objetos mais enigmáticos do Sistema Solar, por meio de missões especiais, envolvendo aproximações e até mesmo aterrissagens.

Para melhor compreendermos o Universo, têm sido decisivas as fotografias obtidas pelo telescópio orbital Hubble (Fig. 1.25). Este instrumento com 12 toneladas, lançado ao espaço em 1990 a mais de 500 km da superfície terrestre, permitiu evitar distorções provocadas pela nossa atmosfera nas imagens fotográficas dos telescópios convencionais. Em poucos anos, o Hubble produziu remotamente, a partir de sistemas de controle na Terra, mais de 270.000 observações preciosas. Entre elas, estão imagens nítidas de nebulosas, galáxias antigas, buracos negros, explosões de supernovas e até mesmo do choque espetacular do cometa Shumacher-Levy contra Júpiter se fizeram disponíveis para astrônomos e astrofísicos, e seus resultados revolucionaram a cosmologia moderna.

Em 1999 foi implementado outro experimento científico ambicioso, denominado projeto *Boomerang*. Um telescópio de duas toneladas e instrumentos de

alta precisão foram instalados num balão atmosférico que se encontra sobrevoando a Antártica, com a finalidade de observar uma região do céu praticamente sem estrelas, buscando captar a luminosidade da chamada **radiação de fundo**, resultante do *Big Bang*. As imagens obtidas por este telescópio permitiram aos cientistas oferecer uma estimativa da densidade do Universo, considerada convincente por muitos astrofísicos, e com isto sugerir que tal densidade estaria abaixo do valor crítico comentado no item 1.1 deste capítulo. Embora a demonstração inequívoca ainda dependa de uma solução definitiva para o mistério da matéria escura, a evidência do projeto *Boomerang* apontaria para a hipótese do Universo **aberto**, portanto com uma expansão contínua para sempre. Voltamos assim às nossas inquietudes metafísicas iniciais, com uma possível resposta para o futuro do Universo. Mas se o nosso Universo teve um início, no *Big Bang*, e se for finalmente demonstrado que ele é eterno e ocupa um espaço em contínua expansão, tendendo portanto ao infinito, não seriam estas características sugestivas da existência de uma vontade criadora?

Nesse contexto, cabe lembrar as palavras de Albert Einstein: *Quero saber como Deus criou este mundo. Não estou interessado neste ou naquele fenômeno, ou no espectro deste ou daquele elemento. Quero conhecer seus pensamentos, o resto são detalhes.*



Fig. 1.25 Telescópio espacial Hubble. Fonte: NASA.

1.1 Planetologia comparada

Atualmente, os planetas do Sistema Solar deixaram de ser objetos de estudo apenas de astrônomos, passando também a ser foco de interesse dos geocientistas. Embora cada objeto no Sistema Solar seja único, o novo campo da Ciência, a planetologia comparada, tem fornecido muitas lições que podem ser aplicadas à Terra, em especial quanto aos tópicos de sua origem e evolução primitiva, conforme resumido nos temas abaixo:

1. O estudo da Lua, Vênus, Marte, e de muitos acondritos, mostrou que o magmatismo de tipo basáltico é onipresente.
2. Embora alguns objetos primitivos, tais como os condritos carbonáceos, sobreviveram para indicar a idade do Sistema Solar, não há evidências da existência de material primordial não transformado, nos planetas e em seus satélites.
3. Os planetas formaram-se quentes, ou tornaram-se quentes logo após a sua origem. A sua estruturação química em manto e núcleo ocorreu numa fase precoce, provavelmente ainda durante a chamada acreção planetária.
4. As diferenças na composição das atmosferas dos planetas internos indicam que as composições originais de seus gases, a perda inicial dos compostos voláteis e os subseqüentes processos de degasificação para a formação das atuais atmosferas foram específicos e distintos, para cada planeta.
5. Aparentemente, o regime de tectônica global do planeta Terra é único.
6. A evidência de grandes impactos pelo bombardeio de corpos de todos os tamanhos durante o crescimento planetário, que continuou pelo menos durante 800 milhões de anos, é observável nas superfícies da Lua, Mercúrio e Marte.

Leituras recomendadas

ANDERSON, D. L. *Theory of the Earth*. Boston: Blackwell, 1989.

CROSWELL, K. *Magnificent Universe*. New York: Simon & Schuster, 1999.

GOMES, C. B. & KEIL, K. *Brazilian Stone Meteorites*. Albuquerque: University of New Mexico Press, 1980.

KERRIDGE, J. F. & MATTHEWS, M. S. (eds.) *Meteorites and the Early Solar System*. Tucson: University of Arizona Press, 1988.

MASSAMBANI, O & MANTOVANI, M. S. (orgs.). *Marte, Novas Descobertas*. São Paulo: Instituto Astronômico e Geofísico, USP, 1997.

WEINER, J. *Planeta Terra*. São Paulo: Martins Fontes, 1986.