



O "novo" sistema solar, após a implantação da classe dos "planetas anões" pela União Astronômica Internacional, em 2006.

Fonte: [Wikipedia](#).

Introdução

Será a Terra um planeta especial no sistema solar ou existem outros como ela? Como terá se formado, e há quanto tempo? Na aula de hoje vamos procurar responder perguntas como essas; vamos estudar os tipos básicos de planetas compõem o nosso sistema solar e a teoria corrente que explica como esse sistema se formou. Também vamos estudar como são obtidas as principais características físicas dos planetas

Bom estudo!

Objetivos

- Descrever, em linhas gerais, a escala do sistema solar;
- Estabelecer as propriedades básicas que diferenciam planetas terrestres e jovianos;
- Resumir a teoria atualmente aceita para a formação do sistema solar, salientando como essa teoria justifica a existência de planetas terrestres e jovianos;
- Entender como as propriedades físicas dos planetas são determinadas e aplicar esse conhecimento em casos reais.



Como se formou o sistema solar?

O sistema solar

Nosso sistema solar está composto pela nossa estrela, o Sol, pelos oito planetas com suas luas e anéis, além dos planetas anões, asteroides e cometas. Os cinco planetas visíveis a olho nu – Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno – já eram conhecidos desde a antiguidade. Os outros planetas foram descobertos depois da invenção do telescópio: Urano, em 1781, por William Herschel (1738-1822) e Netuno, em 1846 por Urbain Jean Joseph Le Verrier (1811-1877) e John Couch Adams (1819-1892).

Plutão foi descoberto em 1930 por Clyde William Tombaugh (1906-1997), e classificado até agosto de 2006 como o nono planeta do sistema solar. Desde então a União Astronômica Internacional reclassificou Plutão como planeta anão, constituindo uma nova categoria de corpos do sistema solar, na qual também foram colocados Ceres, o maior objeto do cinturão de asteroides entre as órbitas de Marte e Júpiter, e Éris (2003UB₃₁₃) o maior asteroide do cinturão de Kuiper.

Os nomes dos planetas são associados a deuses romanos: Júpiter, deus dos deuses; Marte, deus da guerra; Mercúrio, mensageiro dos deuses; Vênus, deusa do amor e da beleza; Saturno, pai de Júpiter, deus da agricultura; Urano, deus do céu e das estrelas, Netuno, deus do mar e Plutão, deus do inferno.

Uma frase mnemônica para lembrar a ordem é:

Meu	Velho	Tio	Me	Jurou	Ser	Um	Netuniano
E	Ê	E	A	U	A	R	E
R	N	R	R	P	T	A	T
C	U	R	T	I	U	N	U
Ú	S	A	E	T	R	O	N
R				E	N		O
I				R	O		
O							

Ou:

Minha Vó Tem Muitas Joias Sem Usar Nenhuma.

O corpo dominante no sistema solar é o Sol, que tem 99,85% da massa do sistema. Em comparação com a Terra, o Sol é 34.000 vezes mais massivo e 1 milhão de vezes maior em volume.

Sistema solar:

Constituído pelo Sol, pelos planetas (Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Netuno), planetas anões, asteroides, cometas, meteoroides e meteoritos.



Tabela 09.01: Massas relativas dos diversos componentes do sistema solar.

Componentes	Massa
Sol	99,85%
Júpiter	0,10%
Saturno	0,03%
Urano e Netuno	0,01%
Terra e Vênus	0,005%
Marte e Mercúrio	0,00005%
Cometas	0,01% (?)
Satélites e anéis	0,00005%
Asteroides	0,0000002%
Meteoroides e poeira	0,0000001% (?)

Todos os planetas giram em torno do Sol aproximadamente no mesmo plano e no mesmo sentido, e quase todos os planetas giram em torno de seu próprio eixo no mesmo sentido da translação em torno do Sol.



Figura 09.01: Nesta figura os tamanhos relativos das órbitas dos planetas estão em escala entre si; mas não na mesma escala dos tamanhos dos planetas. A única órbita acentuadamente não coplanar com as demais é a de Plutão. Todos os planetas orbitam o Sol no mesmo sentido.

Características do sistema planetário do Sol:

- as órbitas dos planetas estão no mesmo plano
- as velocidades orbitais têm o mesmo sentido
- com exceção de Vênus e Netuno, os planetas têm o mesmo sentido de rotação, que é igual ao do movimento orbital.

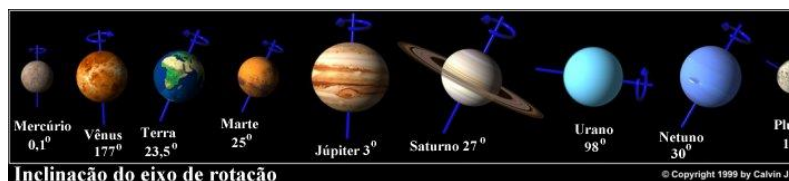


Figura 09.02: Inclinação do eixo de rotação dos planetas em relação ao eixo das respectivas órbitas. A maioria dos planetas gira em torno do próprio eixo no sentido anti-horário na perspectiva de um observador externo olhando para o polo norte do planeta.

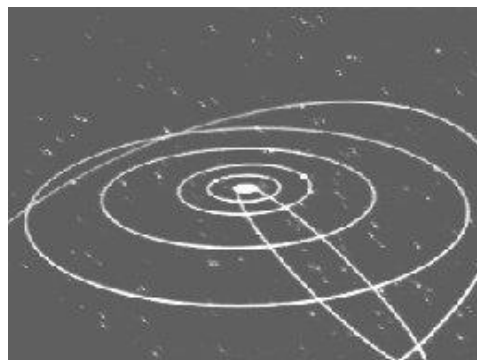


Figura 09.03: Órbitas dos planetas externos em torno do Sol e do cometa Halley (elipse bastante excêntrica). A órbita de Plutão é inclinada 17° em relação ao plano orbital médio dos planetas.



Origem do sistema solar

A teoria atualmente aceita sobre a origem do sistema solar é baseada na *hipótese nebular*, proposta pelo matemático francês Pierre-Simon de Laplace (1749-1827) em 1796, em seu livro *Exposition du Systéme du Monde*. Laplace concluiu que, como todos os planetas estão no mesmo plano, giram em torno do Sol no mesmo sentido e também giram em torno de si mesmo no mesmo sentido (com exceção de Vênus e de Urano), só poderiam ter se formado de uma mesma grande nuvem de material em rotação que teria se contraído sob sua própria gravidade, assumindo a forma discoidal.

Nos anos 1940, o físico alemão Carl Weizäcker desenvolveu a *teoria da nebulosa solar* – uma versão moderna da hipótese nebular, cuja principal contribuição foi detalhar os processos físicos que permitiram os planetas se formarem a partir do material do disco, o que era um aspecto falho na hipótese de Laplace.

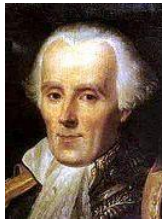


Figura 09.04: Pierre Simon de Laplace (1749 – 1826), à esquerda, e Carl Friedrich Freiherr von Weizäcker (1912 – 2007), à direita.

A teoria da nebulosa solar propõe que o Sol e os planetas se formaram juntos, há bilhões de anos, a partir de uma grande nuvem rotante de gás interestelar que perdeu o equilíbrio e entrou em colapso. Uma vez iniciada a contração, a força gravitacional da nuvem, atuando em si mesma, acelerou o colapso. À medida que a nuvem colapsava, a rotação da nuvem aumentava por conservação do momentum angular e, com o passar do tempo, a massa de gás rotante assumiu forma discoidal, tendo uma concentração central que deu origem ao Sol.

Após o colapso da nuvem, ela começou a esfriar; apenas o *protossol*, no centro, manteve sua temperatura. O resfriamento acarretou a condensação rápida do material, o que deu origem aos *planetesimais* - agregados de material com tamanhos da ordem de quilômetros de diâmetro, cuja composição dependia da distância ao Sol: regiões mais externas tinham temperaturas mais baixas, e mesmo os materiais voláteis tinham condições de se condensar, ao passo que nas regiões mais internas e quentes, as substâncias voláteis foram perdidas. Os planetesimais a seguir cresceram por acreção de material para dar origem a objetos maiores, os *núcleos planetários*. Na parte externa do sistema solar, onde o material condensado da nebulosa continha silicatos e gelos, esses núcleos cresceram até atingirem massas da ordem de 10 vezes a massa da Terra, ficando tão grandes a ponto de poderem atrair o gás a seu redor, e então cresceram mais ainda por acreção de grande quantidade de hidrogênio e hélio da nebulosa solar. Deram origem assim aos *planetas jovianos*. Na parte interna, onde apenas os silicatos estavam presentes, os núcleos planetários não puderam dando origem aos *planetas terrestres*.



As observações modernas indicam que muitas nuvens de gás interestelar estão no processo de colapsar em estrelas, e os argumentos físicos que predizem o achatamento e o aumento da taxa de spin estão de acordo com a hipótese

A melhor determinação da idade do sistema solar vem da determinação das abundâncias isotópicas dos elementos que têm isótopos radiativos e estáveis: $(4,57 \pm 0,02)$ bilhões de anos.

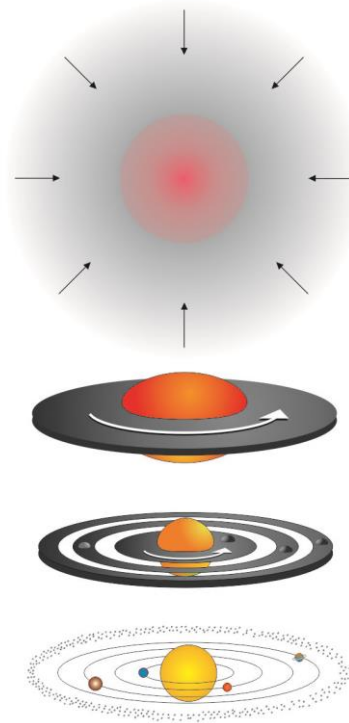


Figura 09.05: Etapas de formação do sistema solar: Uma nuvem de gás interestelar em rotação - a nebulosa solar - colapsa pela autogravidade, com a maior parte da massa caindo para o centro;

À medida que contrai, por conservação do momentum angular, a nuvem gira cada vez mais rápido, adquirindo a forma de um disco com um bojo central - o protossol.

Ao final do colapso, o Sol mantém sua temperatura mas o disco começa a esfriar; partículas sólidas colidem e grudam formando os planetesimais ;

Os planetesimais crescem adicionando a matéria ao redor deles, formando os planetas terrestres nas partes internas do disco e os jovianos na parte externa.

Planetologia comparada

Existem dois tipos básicos de planetas, os **terrestres**, que são do tipo da Terra, e os **jovianos**, que são do tipo de Júpiter. Os planetas terrestres compreendem os quatro planetas mais próximos do Sol: Mercúrio, Vênus, Terra e Marte. Os jovianos compreendem os quatro planetas mais distantes, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno. As características gerais de cada tipo estão na tabela 09.02.



Figura 09.06: Tipos básicos de planetas: os terrestres são pequenos, sólidos e estão próximos ao Sol, os jovianos são grandes, gasosos e estão distantes do Sol.



Tabela 09.02: Características gerais dos planetas terrestres e jovianos

Características	Terrestres	Jovianos
massa	pequena ($\leq 1M_{\oplus}$)	grande ($\geq 14M_{\oplus}$)
tamanho	pequeno	grande
densidade	grande ($\approx 5g/cm^3$)	pequena ($\approx 1g/cm^3$)
distância ao Sol	pequena	grande
composição química	rochas e metais pesados; silicatos, óxidos, Ni, Fe	elementos leves; H, He, água, CO ₂ , metano, amônia
número de satélites	poucos ou nenhum	muitos

Determinação das características físicas:

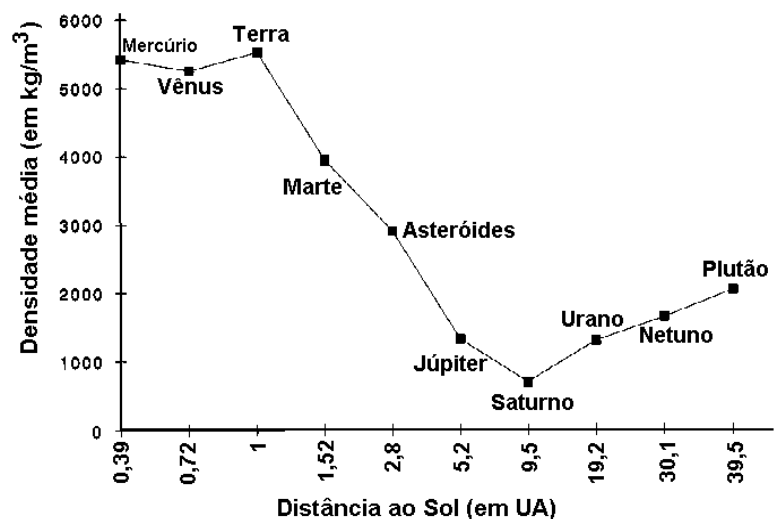
Massa: determinada a partir da terceira lei de Kepler, se o planeta tem satélites. Se não tem, é determinada a partir de perturbações causadas nas órbitas de outros planetas ou de satélites artificiais que são enviados até esses planetas.

$$M+m = \frac{a^3}{P^2},$$

Raio: medido diretamente do tamanho angular, desde que se conheça a distância do planeta.

Distância ao Sol: Determinada por triangulação; no caso dos planetas mais próximos da Terra, atualmente, pode-se fazer por medidas de radar.

Composição química: pode ser estimada a partir da densidade média do planeta, e por espectroscopia, que vamos ver mais adiante nesta disciplina.





Outras propriedades importantes dos planetas são:

Rotação: detectada a partir da observação de aspectos de sua superfície, por medidas de efeito Doppler (quando o planeta gira, as duas bordas apresentam velocidades em relação à Terra com sentidos opostos, de maneira que a radiação que vem de uma borda apresenta desvio para comprimentos de onda menores enquanto a radiação que vem da outra borda apresenta desvios para comprimentos de onda maiores), ou por medidas da taxa de rotação do campo magnético.

Temperatura: como os planetas obtêm a maior parte de sua energia da luz solar, suas temperaturas dependem basicamente de sua distância ao Sol. Existe uma relação simples entre a temperatura característica, ou **temperatura efetiva** (T_{ef}) de um planeta e sua distância ao Sol (a):

$$T_{ef} \propto \sqrt{\frac{1}{a}}$$

Assim, sabendo a temperatura efetiva da Terra (260 K, na ausência de atmosfera), podemos estimar a temperatura efetiva dos outros planetas simplesmente dividindo 260 pela raiz quadrada de sua distância ao Sol em unidades astronômicas.

Reflectividade: A fração da energia solar total incidente sobre o planeta que é refletida na sua superfície chama-se **albedo (A)**.

$$A = \frac{\text{energia espalhada em todas as direções}}{\text{energia solar incidente}}$$

O albedo é uma medida da refletividade da superfície do planeta; quanto maior ele for, melhor o planeta reflete a luz solar e mais brilhante ele fica.

A energia que não é refletida, $(1-A)$ é absorvida pelo planeta e o esquenta, sendo depois reemitida em forma da radiação infravermelha.

Estrutura interna

Para conhecer a estrutura interna dos planetas é necessário saber de que forma certos parâmetros físicos, como pressão, temperatura e densidade, variam com o raio. Como um exemplo, a densidade média (massa/volume) da Terra é $5,5 \text{ g/cm}^3$ e a densidade das rochas (silicatos) na superfície é de $2,6 \text{ g/cm}^3$. Logo a Terra deve ter uma estrutura interna diferenciada.

Tabela 09.03: Estrutura interna da Terra.

Camada	Espessura (km)	Densidade (g/cm^3)
crosta	35	2,5 - 2,6
crosta oceânica	5 - 12	3,0 - 3,5
manto	2.885	4,5 - 10
núcleo externo (líquido)	2.270	10,7 - 11
núcleo interno (sólido)	1.216	13,5



A **distribuição de massa** pode ser obtida através do momento de inércia I em torno do eixo de rotação:

$$I = KMR^2.$$

O fator K caracteriza a distribuição interna de matéria. Se a densidade for homogênea, $K = 0,4$; se a densidade for maior nas partes centrais $K < 0,4$, e vice-versa. Os planetas jovianos também se distinguem dos planetas terrestres por possuírem valores menores de K . A partir de estudos do momento de inércia sabe-se que os núcleos dos planetas jovianos é mais denso e, portanto, menor, e também que Júpiter e Saturno não podem ter superfície sólida de tamanho significativo, isto é, só pode ter um núcleo sólido pequeno.

A estrutura interna de um planeta pode ser bem conhecida se for possível medir a transmissão de **ondas sísmicas** nele. Essas ondas podem ser produzidas por terremotos naturais ou por impactos artificiais, e se propagam em materiais sólidos, como rochas, portanto é uma técnica que se aplica a **planetas terrestres**. Até o momento, somente a estrutura da Terra e da Lua foram investigadas usando esta técnica, o que mostrou claramente a existência de um núcleo metálico na Terra e a ausência de de núcleo metálico na Lua.

No caso de **planetas jovianos**, a estrutura interna pode ser conhecida por mapeamento do campo gravitacional estudando a órbita de uma sonda espacial quando passa pelo planeta, ou aplicando o formalismo hidrostático, que parte do princípio que, se o planeta não está nem se expandindo nem se contraindo, ele tem que obedecer à equação de equilíbrio hidrostático, isto é, em cada ponto, o peso das camadas superiores é balanceado pela força de pressão das camadas inferiores.

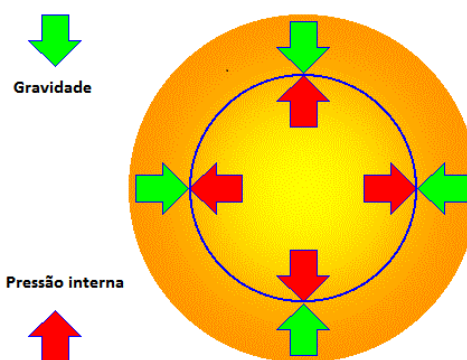


Figura 09.08: Em um corpo em equilíbrio hidrostático, em cada ponto o peso das camadas superiores contrabalança a pressão interna.

A equação de equilíbrio hidrostático é:

$$\frac{dP}{dr} = -\left(\frac{GM\rho}{r^2}\right),$$

onde ρ é a densidade, r é a distância ao centro e M é a massa interna ao raio r . O sinal (-) indica que a pressão aumenta à medida que o raio diminui.



Podemos obter a pressão no centro ($r = 0, P = P_c$) considerando que a pressão na superfície ($r = R, P = P_s$) é muito menor que a pressão no centro ($P_s \ll P_c$). Integrando a equação de equilíbrio hidrostático do centro até a superfície, a pressão central fica determinada como:

$$P_c \approx \frac{4\pi}{3} GR^2 \rho^2.$$

A pressão P_r a uma distância r do centro do planeta fica:

$$P_r = \frac{2\pi}{3} G \rho^2 (R^2 - r^2),$$

que, em unidades do sistema internacional é:

$$P_r = 1,4 \times 10^{-10} \rho^2 (R^2 - r^2) \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}.$$

O formalismo hidrostático é mais aplicável aos planetas jovianos, que são gasosos. No caso dos planetas terrestres, que têm crosta sólida, ele só se aplica às camadas mais profundas.

De um modo geral, os planetas terrestres têm uma atmosfera gasosa, uma superfície sólida bem definida e um interior na maior parte sólido (embora a Terra tenha um núcleo externo líquido). Os planetas jovianos têm uma atmosfera gasosa, nenhuma superfície sólida, e um interior líquido na maior parte. As estruturas internas dos planetas jovianos (também chamados gigantes) e terrestres estão ser esquematizadas na Figura. 09.09.

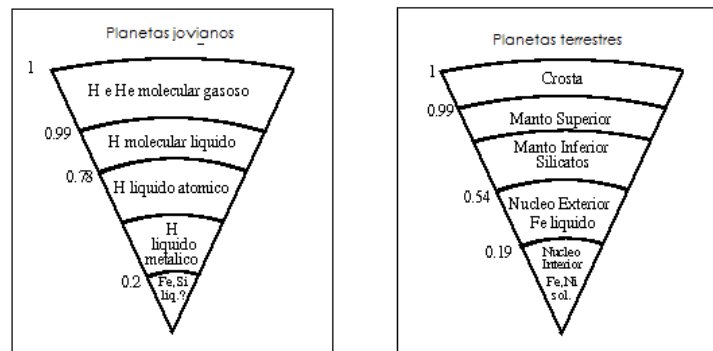


Figura 09.09: Estrutura interna dos planetas jovianos (à esquerda) e dos planetas terrestres (à direita).



Planetas terrestres:

Planetas pequenos e rochosos (como a Terra) que orbitam nas proximidades do Sol.

Planetas jovianos:

Planetas grandes e gasosos (como Júpiter) que orbitam mais distantes do Sol.

Superfícies

As superfícies planetárias podem ser conhecidas de forma preliminar a partir do albedo, se o planeta não tem atmosfera espessa. Em planetas com atmosfera espessa, como os planetas jovianos e Vênus, o albedo não se refere à superfície, mas sim à atmosfera. Júpiter, Saturno e Netuno emitem quantidade significativa de energia própria, às custas de seus calores residuais de contração. A convecção necessária para o transporte desta energia é que causa as grandes manchas (tornados) nestes planetas.



Figura 09.10: As superfícies da Lua e de Mercúrio são parecidas, com grande número de crateras e grandes regiões baixas e planas.

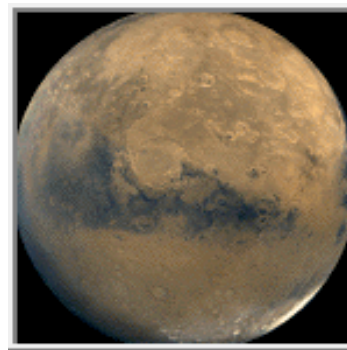


Figura 09.11: Marte apresenta uma superfície com montanhas, vales e canais.

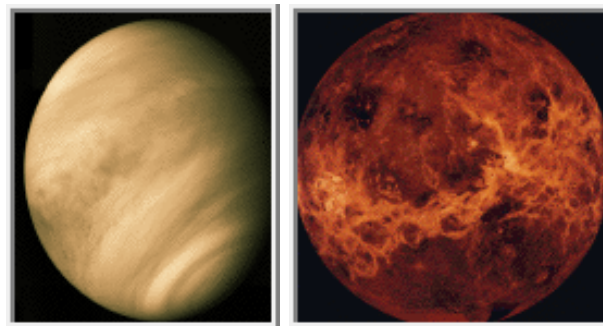


Figura 09.12: A superfície de Vênus não é visível devido às densas nuvens de ácido sulfúrico que cobrem o planeta (à esquerda), mas estudos em rádio (radar) revelam que essa superfície é composta principalmente de terrenos baixos e relativamente planos, mas também apresenta planaltos e montanhas (à direita).

Os principais processos que determinam alterações na crosta posteriormente à sua formação e, portanto, determinam o rejuvenescimento da crosta, são: atividade geológica, erosão e crateramento.



Atividade geológica

A atividade geológica, compreendendo vulcanismo e atividade tectônica, depende da quantidade de energia interna do planeta. A atividade geológica é decrescente para Terra, Vênus e Marte.

A Terra, com cerca de 4,5 bilhões de anos, é um pouco mais jovem do que o Sol, com cerca de 5 bilhões de anos. Na Terra, tanto a presença de vulcões ativos quanto o movimento das placas tectônicas contribuem para o renovamento da crosta. Em Marte existem grandes vulcões, e alguns deles podem ser ativos, mas não há evidência de tectonismo de placas.

Na Lua atualmente acontecem poucos sismos por anos (milhares, comparados com milhões na Terra), mas na época em que a Lua era jovem, há cerca de 4 ou 3 bilhões de anos, houve um grande vazamento de lava à superfície, que posteriormente se solidificou formando os mares (*maris*) lunares (regiões escuras, aparentemente baixa e planas, e que contêm muitas crateras). A Lua tem crosta assimétrica, sendo mais delgada (60 km) no lado voltado para a Terra, e mais espessa (150 km) no lado oposto. O número de mares é maior no lado em que a crosta é delgada.

Vênus aparentemente é menos ativo do que a Terra, mas parece ter mais atividade geológica persistente do que Marte. Isso indica que Vênus teria retido mais energia interna residual do que Marte, o que está de acordo com o fato de Vênus ser maior do que Marte. Também acontece atividade geológica em Io, o satélite de Júpiter mais próximo do planeta. Io apresenta um alto nível de atividade vulcânica.

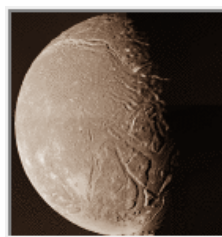


Figura 09.13: Foto de **Ariel**, que assim como Titânia, satélites de Urano, também apresentam sinais de atividade catastrófica recente.

Erosão

A erosão pode ser resultado da ação da atmosfera ou da hidrosfera. Não existe erosão nem em Mercúrio e nem na Lua. Na Terra existe erosão, como é evidenciado pela existência de rochas sedimentares. Mas o planeta em que a erosão é mais importante é Marte, devido às frequentes tempestades de poeira que assolam sua superfície.



Crateramento

As crateras aparecem em todos os planetas terrestres e em quase todos os satélites do Sistema Solar. Elas podem ter origem vulcânica ou de impacto. As crateras vulcânicas são em geral menores e mais fundas do que as de impacto. Na Terra, a maioria das crateras existentes são de origem vulcânica, uma vez que a atividade interna da Terra, assim como a erosão, apagaram grande parte dos efeitos de impactos ocorridos na época em que muitos corpos residuais do processo de formação povoavam o Sistema Solar. Mas na Lua, Mercúrio e Marte, as crateras de impacto são dominantes. As recentes observações com radar da superfície de Vênus mostraram que esse planeta também tem crateras, mas ainda não se sabe ao certo sua principal origem.

O número de crateras de impacto numa superfície nos permite estimar a sua idade, pois o número de crateras é proporcional ao tempo decorrido desde que a superfície foi exposta. Portanto, em um dado planeta, o terreno mais craterado será sempre o mais antigo.



Figura 09.14: Foto de cratera de origem vulcânica, na Terra.

Impactos:

No impacto, a energia cinética

$$E_{\text{cinética}} = \frac{1}{2}mv^2,$$

é parcialmente transformada em uma onda de choque que se propaga pelo corpo impactado, e parte é dissipada na forma de calor. A velocidade de colisão é, no mínimo, igual à velocidade de escape do corpo que está colidindo (11 km/s para a Terra, e 2,4 km/s para a Lua). Assim, para um asteroide típico, com raio = 2,1 km e densidade = 1 g/cm³, sua energia cinética ao colidir com a Terra será (no mínimo) $E_c = 2,4 \times 10^{28} \text{ ergs} = 5,7 \times 10^8 \text{ kton TNT}$. A energia associada ao TNT (Tri-Nitro-Tolueno = nitroglicerina) é $4,2 \times 10^{10} \text{ ergs/g}$.

Para ter uma ideia do que isso representa, a energia associada a uma bomba atômica é de 20 kton TNT, logo no impacto mencionado acima a energia liberada seria equivalente à de 30 milhões de bombas atômicas!

O tamanho da cratera gerada é proporcional à potência 1/3 da energia do impacto. Assim, sabendo que um impacto com energia de 1 Mton TNT abre uma cratera de 1 km de diâmetro, num impacto como o acima descrito a cratera aberta teria um diâmetro de 80 km.

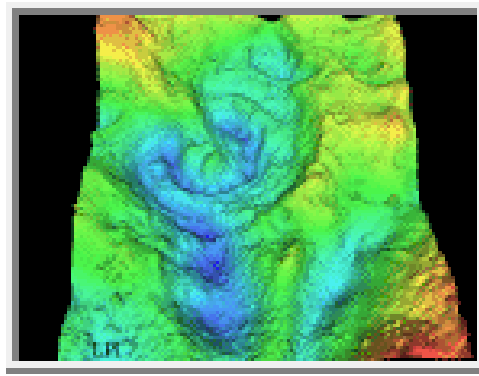


Figura 09.15: A cratera de Chicxulub, no México, supostamente gerada no impacto que causou a extinção dos dinossauros, há 65 milhões de anos, tem diâmetro de 200 km, e acredita-se que o asteroide que a provocou tinha um diâmetro de no mínimo 10 km.

A energia liberada na explosão citada na Figura 09.15, foi equivalente a 5 bilhões de bombas nucleares do tamanho da bomba de Hiroshima. Cálculos atuais mostram que impactos grandes como esse, na Terra, ocorrem numa taxa de 1 a cada 30 milhões de anos. Possivelmente o continente primordial, Pangea, foi rompido há 225 milhões de anos pela colisão de um grande asteroide.

Atmosferas

A composição da atmosfera dos planetas pode ser conhecida pela análise espectral da luz solar que eles refletem. Como essa luz solar refletida atravessou parte da atmosfera do planeta, e as moléculas do gás na atmosfera absorvem certos comprimentos de onda, o espectro apresenta certas linhas escuras que não aparecem no espectro solar. A identificação dessas linhas escuras permite identificar os gases que as produziram, assim como a pressão e temperatura da atmosfera.

Os gases presentes na atmosfera de um planeta depende dos constituintes químicos de que o planeta se formou, e da massa do planeta. Os planetas terrestres se formaram sem atmosferas extensas, e sua atmosfera atual não é primitiva, mas sim foi formada ao longo do tempo geológico a partir de gases escapados de seu interior. O impacto com cometas também contribui com alguns componentes dessa atmosfera secundária.

Já os planetas massivos têm um tipo de atmosfera totalmente diferente, dominada pelos gases mais leves e mais comuns, especialmente hidrogênio e hélio. Evidentemente esses planetas foram capazes de reter o gás presente no sistema solar na época de sua formação.

Retenção de atmosferas

A retenção de atmosferas é um compromisso entre a energia cinética (ou temperatura) das moléculas do gás e a velocidade de escape do planeta (ou de sua massa).

Sabe-se que para um gás ideal, a energia cinética média de suas moléculas é

$$\frac{1}{2}m\bar{v}^2 = \frac{3}{2}kT,$$



onde k é a constante de Boltzmann, T é a temperatura absoluta do gás, m é a massa das moléculas do gás e \bar{v} sua velocidade média.

A constante de Boltzmann: $k = 1,381 \times 10^{-23} \text{J/K}$.

Portanto, a velocidade média é

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}.$$

A velocidade das moléculas, portanto, depende da temperatura do gás e da massa molecular do gás. A uma mesma temperatura, quanto mais pesado o gás, menor a velocidade média de suas moléculas.

Como as moléculas do gás têm uma distribuição Maxwelliana de velocidades, a probabilidade $P(v)$ de que uma partícula tenha velocidade (v) é dada por:

$$P(v) = \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{mv^2}{2kT}}.$$

Algumas moléculas têm velocidade maior que a velocidade média.

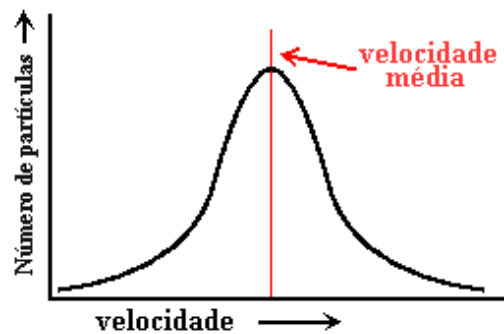


Figura 09.16: Gráfico que relaciona o número de partículas do gás em função de suas velocidades. A maioria das partículas tem velocidade igual à velocidade média, mas tem muitas partículas com velocidades bem maiores ou bem menores do que a média.

Para calcular quantas partículas escapam, integramos a distribuição de velocidades de Maxwell desde a velocidade de escape até velocidade infinita.

$$P_{\text{max}} = \int_{v_{\text{esc}}}^{\infty} P(v) dv.$$

Estes cálculos mostram que, para um planeta reter um certo gás por bilhões de anos, a velocidade média de suas moléculas deve ser menor do que 1/6 da velocidade de escape do planeta, pois isso garante que praticamente todas as partículas do gás tenham velocidade menor do que a velocidade de escape, já que:

$$\int_6^{\infty} P(v) dv = 10^{-9}.$$

ou seja, a probabilidade de que uma partícula tenha velocidade maior do que seis vezes a velocidade média é de 1 em 1 bilhão.



Portanto, a relação entre a velocidade média das partículas do gás e as características massa e raio do planeta é:

$$\bar{v} \leq \frac{1}{6} v_{\text{escape}} = \frac{1}{6} \sqrt{2GM/r}.$$

Por exemplo, a velocidade média das moléculas do oxigênio (O₂), a uma temperatura de 200 K (temperatura típica no topo da troposfera da Terra), é de 0,4 km/s, e a velocidade média das moléculas do hidrogênio (H₂), na mesma temperatura é de 2 km/s. Como a velocidade de escape da Terra é 11 km/s, que é mais do que o sêxtuplo da velocidade média das moléculas de oxigênio, mas é menos do que 6 vezes maior do que a velocidade média das moléculas do hidrogênio, a atmosfera da Terra retém o oxigênio, mas não o hidrogênio.

Tabela 09.04: Velocidade de escape dos planetas.

Planeta	Velocidade (km/h)
Mercúrio	4,2
Vênus	10,3
Terra	11,2
Lua	2,4
Marte	5,0
Júpiter	61
Saturno	37
Urano	22
Netuno	25

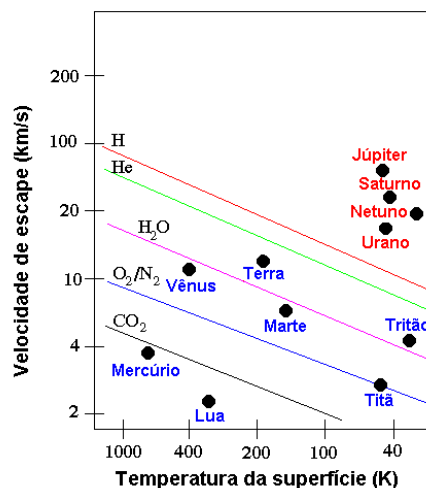


Figura 09.17: O diagrama mostra a velocidade de escape em função da temperatura na atmosfera dos planetas e de alguns satélites (círculos pretos), juntamente com a variação da velocidade dos gases H (linha vermelha), hélio (linha verde), vapor d'água (linha rosa), dióxido de oxigênio e de nitrogênio (linha azul) e gás carbônico (linha preta) em função da temperatura.



A maioria dos planetas que têm atmosferas experimenta alguma elevação da temperatura de sua superfície devido ao efeito de acobertamento pela atmosfera, o chamado *efeito estufa*. O efeito estufa é maior para Vênus, que na realidade, tem uma temperatura superficial mais alta do que a de Mercúrio, embora esteja muito mais distante do Sol do que este.

Isso acontece por causa da grande quantidade de CO_2 na atmosfera de Vênus. Como este gás é opaco à radiação infravermelha, quando a superfície do planeta absorve a luz solar e re-irradia parte dele como calor (radiação infravermelha), o dióxido de carbono na atmosfera impede que essa radiação escape para fora. Em consequência, a superfície aquece.

Na Terra, a quantidade de dióxido de carbono foi reduzida como consequência da existência de vida. Na ausência de vida provavelmente teríamos uma atmosfera mais massiva e dominada por CO_2 .

Os organismos vivos contribuem para a diminuição desse gás na atmosfera de duas maneiras: uma é que as criaturas marinhas usam os carbonatos como principal constituinte de suas conchas e carapaças protetoras. Quando elas morrem, essas cascas afundam e se petrificam, até que eventualmente são ejetadas para a superfície nas explosões vulcânicas.

Mas os organismos vivos rapidamente os reciclam novamente. A outra maneira como a vida remove o CO_2 é pela produção de depósitos de combustíveis fósseis, predominantemente o carvão.

Apesar de existir em pequena quantidade, o CO_2 presente na atmosfera da Terra ainda é o principal fator da produção do efeito estufa na Terra, embora o vapor d'água e os CFCs também contribuam.

Estima-se que a temperatura média da Terra está atualmente 1°C mais alta do que estava há um século. O nível do mar aumentou cerca de 15 a 20 cm neste século.

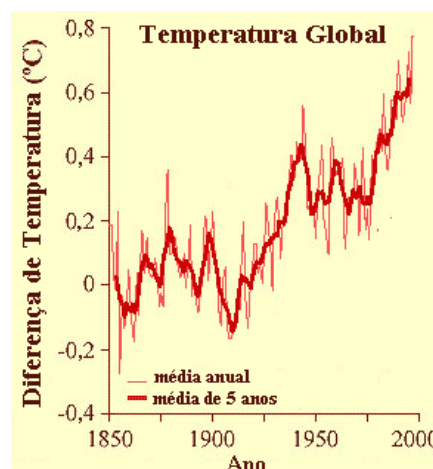


Figura 09.18: edidas da variação da temperatura global em relação à temperatura de 1950, mostrando um aumento de $0,8^\circ\text{C}$ até o ano 2000.



Resumo

O Sistema Solar é constituído pelo Sol, os oito planetas (Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno) juntamente com seus satélites e anéis, os planetas anões, asteroides, meteoroides e meio interplanetário. O corpo dominante é o Sol, que tem 99,8 % da massa do sistema. Todos os planetas giram em torno do Sol aproximadamente no mesmo plano e no mesmo sentido, e quase todos os planetas (as exceções são Vênus e Urano), assim como o próprio Sol, giram em torno de seu eixo no mesmo sentido da translação dos planetas em torno do Sol.

Embora o raio do sistema planetário seja de apenas 40 unidades astronômicas (raio da órbita de Plutão), O sistema solar se estende a distâncias de aproximadamente 50 mil unidades astronômicas do Sol, região onde hipoteticamente se encontram os núcleos cometários que povoam a nuvem de Oort. A hipótese mais provável para a origem do sistema solar a partir de uma nuvem de gás interestelar que colapsou, a nebulosa solar.

Os planetas do sistema solar se classificam em duas categorias principais: os planetas terrestres, que são pequenos, rochosos e orbitam bem perto do Sol, e os planetas jovianos, que são grandes, gasosos, e têm órbitas muito distantes do Sol. Todos os planetas jovianos têm anéis e muitos satélites.

O espaçamento entre os planetas é muito grande comparado com seus tamanhos; se o Sol tivesse o tamanho de uma bola de futebol a Terra teria o tamanho de um grão de pimenta, e estaria a uma distância de 25 metros dele; Plutão teria o tamanho de uma ponta de alfinete, e estaria a 1 km de distância.

A estrutura interna dos planetas jovianos (gasosos) é estudada presumindo que a pressão interna varia com o raio de acordo com a equação de equilíbrio hidrostático. No caso de planetas terrestres esse formalismo só se aplica às camadas mais profundas. As estruturas internas da Terra e da Lua foram estudadas através de sismos (naturais ou provocados), que revelaram que a Terra tem um núcleo interno de ferro que é ausente na Lua.

Os gases que compõem as atmosferas dos planetas tendem a escapar lentamente para o espaço, o que acontece tão rapidamente quanto maior a temperatura do planeta e quanto menor a velocidade do planeta. A condição para um gás não escapar é que a velocidade média de suas moléculas seja menor do que 1/6 da velocidade de escape do planeta.

As idades das superfícies dos planetas podem ser estimadas pelo número de crateras de impacto que apresentam: quanto maior o número de crateras, mais velha é a superfície. O diâmetro da cratera é proporcional à raiz cúbica da energia do impacto. A energia do impacto é a energia cinética do corpo impactante, que terá uma velocidade de, no mínimo, a velocidade de escape do planeta.



Questões de fixação

1. Compare o Sol com os demais corpos do sistema solar em termos da massa e tamanho.

2. Qual o tamanho do sistema planetário? O Sistema Solar termina no último planeta ou continua além?

3. Escreva os nomes dos planetas em ordem crescente de distância ao Sol, classificando-os em terrestres ou jovianos.

4. Descreva em poucas palavras qual a teoria mais aceita sobre a origem do sistema solar.

5. Como essa teoria justifica a diferença entre planetas terrestres e jovianos?

6. Como se pode estudar a estrutura interna de um planeta terrestre? E de um planeta Joviano?

7. Qual a relação entre a densidade de um planeta e a sua composição química?

8. Que fenômenos alteram a superfície de um planeta?

9. Qual a origem das atmosferas dos planetas terrestres? E dos jovianos? O que faz com que um planeta retenha a sua atmosfera primordial ou não?

10. Suponha um átomo de massa m na atmosfera de um planeta de massa M , raio R e temperatura atmosférica T . Sabendo que a energia cinética média das partículas de um gás é dada pela expressão

$$E_{cin} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT,$$

onde v é a velocidade média das partículas, e $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, deduza uma expressão para a temperatura mínima da atmosfera do planeta para que os átomos de massa m escapem de seu campo gravitacional. Expresse essa temperatura em termos de m , k e v_e , a velocidade de escape do planeta.

11. Calcule:

a) a temperatura máxima que a Terra poderia ter para manter hidrogênio atômico ($m_H = 1,6 \times 10^{-27} \text{ kg}$) em sua atmosfera;

b) a temperatura mínima para que o oxigênio atômico ($m_o = 16 m_H$) escapasse de sua atmosfera.

12. Cientistas calculam que o impacto ocorrido em 1908, em Tunguska, liberou uma energia de 15 Mton (1ton = $4,2 \times 10^{16} \text{ ergs}$). Qual o tamanho provável do asteroide impactante? Suponha que a densidade do asteroide é 3 g/cm^3 , e que a velocidade do asteroide no impacto era igual a velocidade de escape da Terra.

