



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-7177-PUD/38

CAPÍTULO 3

O SISTEMA SOLAR*

Cláudia Vilega Rodrigues**

e-mail: claudia@das.inpe.br

INPE
São José dos Campos
2003

O SISTEMA SOLAR

3.1	INTRODUÇÃO	9
3.2	A EVOLUÇÃO DO CONHECIMENTO SOBRE O SISTEMA SOLAR	9
3.3	DESCRIÇÃO DO SISTEMA SOLAR	13
3.3.1	O SOL	15
3.3.2	OS PLANETAS E SEUS SATÉLITES	17
3.3.3	ASTERÓIDES	33
3.3.4	COMETAS	34
3.3.5	METEOROS, METEORITOS E METEORÓIDES	35
3.4	OS MOVIMENTOS NO SISTEMA SOLAR	36
3.4.1	AS LEIS DE KEPLER	37
3.4.2	A LEI DE TITIUS-BÖDE	39
3.5	A FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR	40
3.6	EXISTEM OUTROS SISTEMAS PLANETÁRIOS NO UNIVERSO?	43
3.7	BIBLIOGRAFIA	45

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 - O MODELO GEOCÊNTRICO (INPE).....	10
FIGURA 3.2 - O MODELO HELIOCÊNTRICO (INPE).....	11
FIGURA 3.3 – IMAGEM DO SOL NA LINHA DE EMISSÃO K DO CAII OBTIDA NO NATIONAL SOLAR OBSERVATORY (NSSDC).....	15
FIGURA 3.4 – MOSAICO DE IMAGENS DO PLANETA MERCÚRIO OBTIDAS COM A SONDA MARINER 10 (NSSDC).....	21
FIGURA 3.5- O PLANETA VÊNUS OBSERVADO PELA SONDA GALILEO (NSSDC).....	22
FIGURA 3.6- MOSAICO DE IMAGENS DO PLANETA TERRA OBTIDAS COM A SONDA CLEMENTINE (NSSDC).	25
FIGURA 3.7 – IMAGEM DA LUA CHEIA OBTIDA PELA APOLLO 11 (NSSDC).....	26
FIGURA 3.8 – IMAGEM DO PLANETA MARTE OBTIDA COM O HUBBLE SPACE TELESCOPE (STScI).....	27
FIGURA 3.9 – IMAGEM DO PLANETA JÚPITER E SEU SATÉLITE IO OBTIDA PELO HUBBLE SPACE TELESCOPE (STScI).....	28
FIGURA 3.10 – IMAGEM DO PLANETA SATURNO OBTIDA PELA VOYAGER 2 (NASA).	29
FIGURA 3.11 - O PLANETA URANO COM SEU DISCO E SATÉLITES. IMAGEM OBTIDA COM O HUBBLE SPACE TELESCOPE (STScI).	31

FIGURA 3.12 – IMAGENS DOS DOIS HEMISFÉRIOS DO PLANETA NETUNO OBTIDAS COM O HUBBLE SPACE TELESCOPE (STSCI).	32
FIGURA 3.13 – IMAGEM DO PLANETA PLUTÃO E SEU SATÉLITE CARONTE OBTIDA COM O HUBBLE SPACE TELESCOPE (STSCI).	33
FIGURA 3.14 – IMAGENS DO COMETA HALE-BOPP OBTIDAS COM O HUBBLE SPACE TELESCOPE (STSCI).	35
FIGURA 3.15 - UM EXEMPLO DE ÓRBITA DE COMETA.	35
FIGURA 3.16 – METEORITO DE UM FRAGMENTO DO ASTERÓIDE VESTA (NASA).	36
FIGURA 3.17 - LEI DAS ÁREAS.	39
FIGURA 3.18 - UM DISCO PLANETÁRIO OBSERVADO NA REGIÃO DE ÓRION PELO HUBBLE SPACE TELESCOPE (STSCI).	43

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - ALGUNS DADOS SOLARES.....	16
TABELA 3.2 - ALGUNS DADOS ORBITAIS DOS PLANETAS.....	19
TABELA 3.3 - ALGUNS DADOS FÍSICOS DOS PLANETAS.....	20
TABELA 3.4 - ALGUNS DADOS DA TERRA E DA LUA.	26
TABELA 3.5 – LEI DE TITIUS-BÖDE	40

3.1 INTRODUÇÃO

O sistema solar é formado pelo Sol, planetas e seus satélites – como a Terra e a Lua -, outros corpos menores – como cometas e asteróides -, além do meio interplanetário. O que são esses astros? Quais são seus tamanhos? Como se movimentam? Do que são formados? Qual sua origem? Nas próximas páginas, vamos apresentar respostas breves a essas perguntas.

Atualmente o Homem já pode responder a algumas dessas perguntas com certa segurança. Nas próximas seções vamos apresentar um pouco do que se conhece sobre o sistema solar.

3.2 A EVOLUÇÃO DO CONHECIMENTO SOBRE O SISTEMA SOLAR

Os astros do sistema solar, principalmente o Sol, estão muito presentes em nosso cotidiano. A maneira como medimos o tempo, a nossa percepção visual e a nossa própria existência estão diretamente ligadas às condições existentes no sistema solar. A nossa visão está adaptada ao tipo de radiação eletromagnética – luz visível - que é capaz de penetrar a nossa atmosfera (veja Capítulo 2). Essa radiação é também a mais emitida pelo Sol. A escala de tempo que utilizamos em nosso cotidiano é baseada nos ciclos do Sol e da Lua. Até mesmo a energia encontrada na superfície terrestre é, em sua maior parte, proveniente do Sol.

Uma das questões fundamentais da Humanidade é entender o Universo que a cerca e do qual faz parte. O sistema solar, até há poucos séculos, constituía todo o Universo conhecido. É relativamente recente a noção de que as estrelas que vemos no céu são astros similares ao Sol; mas muito mais distantes. Como já foi dito no Capítulo 1, a observação do céu noturno, ainda na Antigüidade, mostrou ao Homem que alguns astros se movimentam contra um fundo de "estrelas fixas". Esses objetos celestes foram chamados planetas, isto é, astros errantes, pois planeta vem do grego e significa errante. São eles: a Lua, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno. Hoje o significado da

palavra planeta é diferente, e não mais chamamos a Lua de planeta. Mas, o que é a Lua? E o que são os hoje chamados planetas? Isso ficará claro na Seção 3.3.

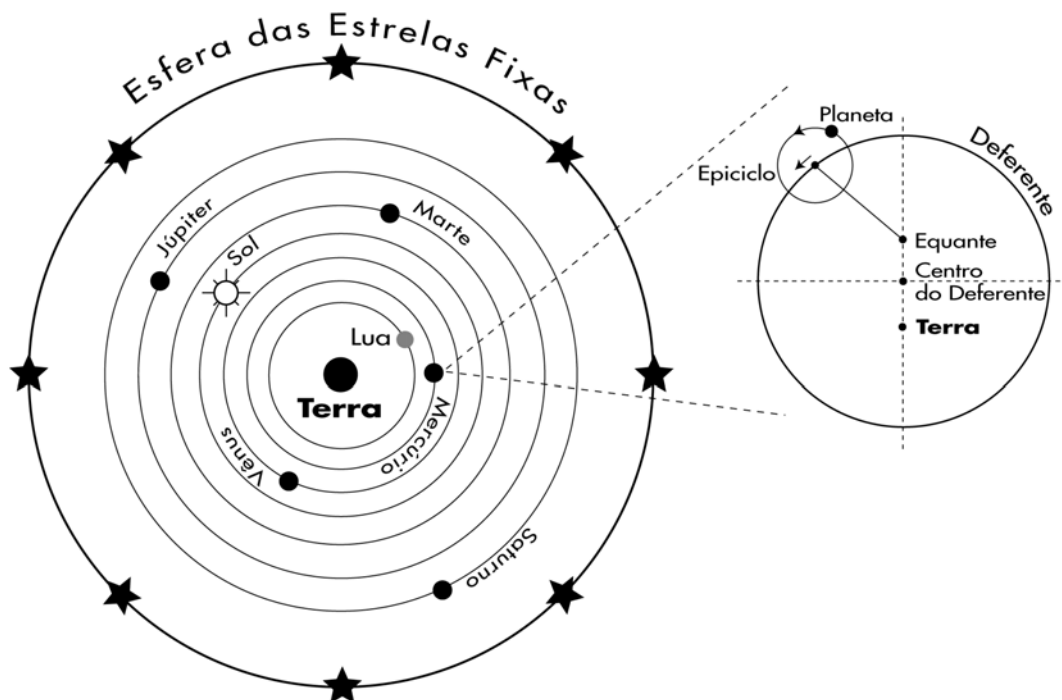


FIGURA 3.1 - O MODELO GEOCÊNTRICO (INPE).

Muito se pensou sobre a distribuição e a organização dos astros no céu. O modelo que dominou o pensamento filosófico europeu até o século XVI é o chamado modelo geocêntrico. Geo, em grego, significa Terra. Assim, geocêntrico significa que coloca a Terra no centro. Esse modelo foi sistematizado por Ptolomeu (astrônomo, matemático e geógrafo) no século II, a partir de idéias preexistentes. Nesse modelo a Terra era o centro do Universo e em torno dela orbitavam os astros que citamos há pouco, além do Sol. Quanto maior o tempo gasto para um planeta dar uma volta completa ao redor da Terra - isto é, retornar ao mesmo ponto do céu em relação às estrelas fixas - maior era a sua distância. Assim, pensava-se que a ordem dos planetas era a da Figura 3.1, que apresenta um esboço em duas dimensões do modelo geocêntrico. As estrelas fixas ficavam todas a uma mesma distância, maior do que a do planeta considerado o mais distante na época, Saturno. Para explicar corretamente os movimentos e brilhos

observados dos planetas, o modelo geocêntrico necessitava de uma série de complicações geométricas, como os eqüantes e deferentes.

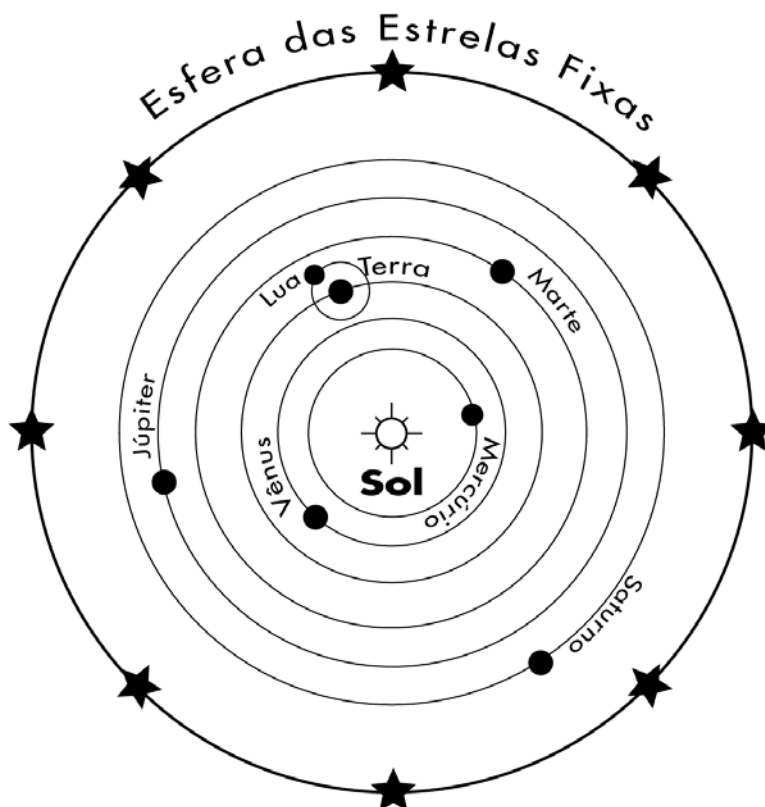


FIGURA 3.2 - O MODELO HELIOCÊNTRICO (INPE).

Com o objetivo de explicar com mais simplicidade o movimento dos planetas, o astrônomo polonês Nicolau Copérnico (1473-1543) propôs, em 1543, o modelo heliocêntrico: Hélio, em grego, significa Sol. Nesse modelo o Sol encontrava-se no centro e os planetas orbitavam ao seu redor. A única exceção era a Lua, que continuava orbitando em torno da Terra (veja a Figura 3.2). Um modelo em que o Sol ficaria no centro do Universo já tinha sido proposto por Aristarcos de Samos (281 a.C.) e Nicolas de Cusa (1401-1464), porém, sem maiores repercussões. O modelo heliocêntrico não era apenas mais simples: ele também explicava várias supostas coincidências do modelo geocêntrico de modo natural. Além disso, Copérnico determinou os raios e períodos das órbitas dos planetas com uma precisão muito boa, apesar de considera-las circunferências.

O astrônomo e físico italiano Galileu Galilei (1564-1642), no início do século XVII, foi o primeiro a observar o céu com o auxílio de um telescópio. Entre as suas descobertas estão as fases de Vênus e os satélites de Júpiter. Essas observações corroboravam o modelo heliocêntrico. Esse modelo tirava a Terra e, portanto o Homem, do centro do Universo. Além disso, Galileu obteve vários resultados experimentais sobre os movimentos dos corpos que ajudaram a compor a base do trabalho de Newton (veja adiante).

O modelo de Copérnico, porém, ainda possuía problemas. Ele considerava as órbitas dos planetas circunferências perfeitas e para explicar corretamente os movimentos observados eram necessários artifícios geométricos, exatamente como acontecia com o modelo geocêntrico. Foi o astrônomo alemão Johannes Kepler (1571-1630), no início do século XVII, quem mostrou que as órbitas planetárias eram elípticas. Para isso, ele contou com as observações do astrônomo dinamarquês Tycho Brahe (1546-1601), do qual foi assistente durante o último ano de vida e seu sucessor como responsável pelo observatório de Uraniborg (na época pertencente à Dinamarca, agora dentro dos limites da Suécia). Os dados obtidos por Tycho Brahe eram os mais precisos da época e no limite do que o olho humano, sem auxílio de instrumentos, pode conseguir. E foi tentando explicar esses dados – que não eram compatíveis com o modelo de Copérnico – que ele propôs três leis que descrevem corretamente os movimentos dos planetas (veja Seção 3.4).

Com o trabalho de Kepler passou-se a saber *como* os planetas se movimentavam ao redor do Sol. Mas ainda restava uma pergunta básica: *por quê?* Foi só com a Teoria da Gravitação Universal do físico e matemático inglês Isaac Newton (1643-1727), publicada em 1687, que isso foi respondido. A teoria da gravitação mostra que os corpos se atraem uns aos outros, isto é, um corpo cria em torno de si um campo gravitacional que é sentido por todos os outros corpos (veja quadro no Capítulo 1). Esse campo gravitacional é tanto mais intenso quanto maior a massa do corpo, e decresce proporcionalmente com o quadrado da distância. Essa é a razão porque a Terra está ligada ao Sol, por exemplo. Mais do que isso, nas escalas astronômicas a força gravitacional é dominante e rege grande parte dos fenômenos celestes. Newton, em sua

teoria, também descreveu exatamente como um corpo se movimenta quando sujeito a uma certa força, qualquer que seja sua natureza. Com esses dois fundamentos foi possível entender a dinâmica do sistema solar. Em “Os Princípios Matemáticos da Filosofia Natural”, o “Principia”, Newton não só demonstra as leis de Kepler e calcula fenômenos conhecidos como as marés e a precessão dos equinócios, mas também prevê e determina a forma achatada da Terra. A partir daí, estava aberto o caminho para o desenvolvimento da astronomia moderna.

Desse modo, no final do século XVIII, os movimentos dos maiores corpos do sistema solar eram explicados tanto do ponto de vista de sua descrição, como de sua causa. Porém, como o sistema solar surgiu? O filósofo alemão Immanuel Kant (1724-1804) foi o primeiro a propor a hipótese nebular em 1755, que foi posteriormente desenvolvida pelo matemático francês Pierre-Simon de Laplace (1749-1827). Ela considera que o sistema solar formou-se a partir de uma nuvem de gás e poeira em rotação (veja a Seção 3.5). Apesar de outras teorias terem surgido, esta é ainda a teoria mais aceita sobre a formação do sistema solar e do Sol e é corroborada por observações de outras estrelas. No momento, estamos passando por uma nova fase do conhecimento do sistema solar: estamos descobrindo planetas em torno de outras estrelas - veja a Seção 3.6. Essas novas descobertas irão ampliar ainda mais o nosso horizonte sobre as nossas origens.

3.3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA SOLAR

O sistema solar inclui o Sol e os planetas, mas abrange bem mais do que isso. Como podemos definir o que é e como é composto o sistema solar? No Universo, a distribuição e hierarquia dos objetos são regidas basicamente pela força gravitacional. Como o Sol é formado por uma grande quantidade de matéria concentrada em uma região relativamente pequena, ele é um foco de atração que reúne em torno de si vários corpos (planetas, asteróides, cometas, etc.). Assim, uma das definições para o sistema solar é: o conjunto de todos os corpos (ou matéria) cujo principal centro de atração é o Sol. Ela não é a única, porém, a consideramos a melhor.

Como já mencionado várias vezes ao longo desta apostila, a força gravitacional mantém dois corpos unidos. Vamos considerar, por exemplo, a Terra e a Lua. Sabemos que é a

força gravitacional que as mantém unidas, mas, se a força é de atração e na direção da linha que une os seus centros, por que, então, esses dois corpos não colidem? Isso acontece devido à rotação. A quantidade de rotação de um corpo com relação a um ponto é medida por uma grandeza chamada *momento angular*.

A maior parte da massa do sistema solar está concentrada no Sol (99,86%!!!). Já o seu momento angular está praticamente distribuído nos planetas. Estes giram em torno do Sol no mesmo sentido que o Sol gira em torno de si mesmo, ou de seu eixo. Falando em linguagem astronômica, o sentido de rotação do Sol é o mesmo da translação dos planetas. Esse sentido é chamado prógrado. Mas nem todos os planetas rotacionam (giram em torno de si mesmos) nesse mesmo sentido. O sentido de rotação de Vênus, Urano e Plutão é contrário ao sentido prógrado, isto é, a rotação desses corpos é retrógrada.

No parágrafo anterior dissemos que os planetas giram em torno do Sol. Isto não é absolutamente correto. Os planetas giram em torno do centro de massa do sistema solar (veja quadro sobre centro de massa no Capítulo 1). Aliás, o próprio Sol, além de sua rotação, também translada em torno desse centro de massa. Em algumas configurações, o centro de massa do sistema solar pode estar a uma distância de dois raios solares do centro do Sol. Porém, na maior parte dos casos essa distância pode ser desprezada e o Sol pode ser considerado o centro do sistema solar.

Uma outra característica do sistema solar é a de que as órbitas dos planetas e o equador do Sol estão aproximadamente em um mesmo plano. As órbitas são, também, quase circulares. Essas informações são importantes, não apenas para caracterizar o sistema solar, mas também porque devem ser reproduzidas pelos modelos que tentam explicar a sua formação.

Nas últimas décadas, as missões espaciais produziram um grande avanço no conhecimento sobre o sistema solar. Foram elas que proporcionaram grande parte do que será apresentado nas próximas seções.

A seguir, vamos apresentar uma pequena descrição dos componentes do sistema solar.

3.3.1 O SOL

O Sol é, entre os corpos celestes, aquele que mais influencia as nossas vidas. É impossível não notá-lo em um dia claro de verão, ou perceber a sua "ausência" em um dia chuvoso. Foi chamado de Hélio pelos gregos, Mítras pelos persas e Rá pelos egípcios, para citar algumas culturas. Cinco séculos antes da era Cristã, o grego Anaxágoras (aproximadamente 430 a.C.) sugeriu que o Sol fosse uma bola de fogo, o que guarda uma pálida semelhança com a realidade.

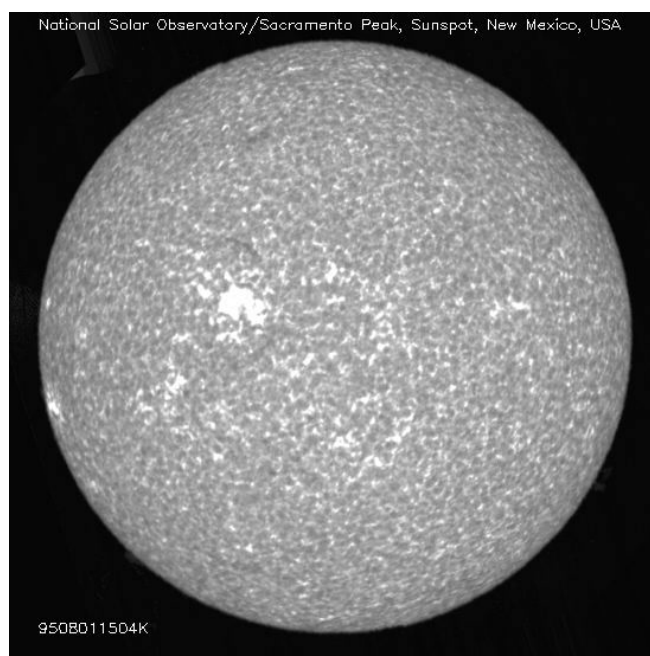


FIGURA 3.3 – IMAGEM DO SOL NA LINHA DE EMISSÃO K DO CAII OBTIDA NO NATIONAL SOLAR OBSERVATORY (NSSDC).

Como já foi mencionado, o Sol é o centro gravitacional do sistema solar. Em torno dele orbitam os outros corpos, e é ele que mantém o sistema coeso. Mas, o que é o Sol? O Sol é uma estrela. Dentre as estrelas existentes no Universo, o Sol pode ser classificado como uma estrela típica, das mais comuns que existem no Universo. O Capítulo 5 fala com mais detalhes sobre as estrelas. Por ser uma estrela, o Sol é uma fonte de energia. De toda energia existente na superfície da Terra, a maior parte é proveniente do Sol que

fornece 99,98% dela. O brilho dos corpos do sistema solar é constituído, basicamente, pela reflexão da luz solar em sua superfície.

O Sol é uma massa que se mantém coesa pela sua própria força de gravidade. O mesmo ocorre com os planetas. Por que a diferença, então? A resposta é que o Sol possui uma massa muito grande. Quão grande? Grande o suficiente para que a contração provocada pela força da gravidade torne tão altas as densidades e temperaturas em seu centro que passam a ocorrer as reações de fusão nuclear, com enorme produção de energia. É esse processo que caracteriza uma estrela e que não ocorre nos planetas. Veja mais detalhes sobre estrelas no Capítulo 5.

O Sol é uma esfera gasosa cuja temperatura na superfície é de cerca de 5 500 centígrados. No núcleo solar a temperatura atinge 15 milhões de graus. Sua massa é 333 mil vezes maior que a da Terra, mas a sua densidade média é de apenas 1,41 gramas por centímetro cúbico, pouco maior que a da água que é de 1 grama por centímetro cúbico. Sua massa é composta por 73% de hidrogênio, o primeiro elemento químico da tabela periódica, e também o mais abundante no Universo. O restante é constituído basicamente por hélio. Apenas 0,1 % da massa do Sol é composta por elementos mais pesados. A Tabela 3.1 mostra alguns dados relativos ao Sol.

TABELA 3.1 - ALGUNS DADOS SOLARES (FONTE: NSSDC)*.

Massa	332.950 massas terrestres
Raio médio	109,2 raios terrestres
Densidade média	1,408 gramas por centímetro cúbico
Densidade central	162,2 gramas por centímetro cúbico
Período de rotação	609,12 horas (cerca de 25 dias)
Distância média à Terra	149,6 milhões de quilômetros

*Veja na Tabela 3.4 os valores relativos à Terra.

É no núcleo solar, com sua altíssima temperatura, que ocorrem as reações nucleares de produção de energia. Essa energia é transportada até a superfície através de camadas

que envolvem o núcleo, denominadas envoltórios. Na camada logo abaixo da superfície solar ocorre o processo de convecção do gás que aflora à superfície. A convecção é uma das formas pelas quais a energia é transportada de um local para outro (ver quadro sobre Formas de Transporte de Energia). As porções mais internas do gás, aquecidas pela radiação que vem do núcleo, expandem-se e sobem até a superfície, onde perdem energia e esfriam. Ao esfriarem, tornam-se mais densas e pesadas, voltando a descer. É devido a esse processo, chamado convectivo, que a superfície do Sol apresenta-se coberta por grãos. Observando-se a superfície solar com grande ampliação os padrões de granulação se assemelham às bolhas de gás quente transportando a energia do interior para a superfície.

FORMAS DE TRANSPORTE DE ENERGIA

Existem três formas de transportar-se energia: por condução, convecção e radiação.

Condução: Quando a sua mão se aquece ao segurar uma chapa de metal quente, a energia está sendo transportada por condução da chapa para sua mão.

Convecção: Quando você esquentar um bule de água para fazer café, inicialmente a energia é transmitida através da água pelo modo condutivo. Porém, em um dado momento, a água de baixo fica muito mais quente que a da superfície e a condução sozinha não dá conta do transporte. Daí a água começa a ferver, isto é, bolhas de água quente sobem do fundo para a superfície. Nesse ponto, temos o transporte convectivo de energia.

Radiação: Uma outra maneira de transportar energia é através da radiação. Vamos voltar ao exemplo da chapa de metal quente. Você também pode aquecer a sua mão sem encostar na chapa. Colocando sua mão perto de um ferro quente, você pode sentir o seu calor. Nesse caso, é a radiação que transporta o calor do ferro para sua mão. A energia que recebemos do Sol é transmitida de forma radiativa, também.

O Sol encontra-se a uma distância média de 150 milhões de quilômetros da Terra. Isso equivale a cerca de 8 minutos-luz, isto é, a luz do Sol demora esse tempo para chegar à

Terra. A segunda estrela mais próxima é Próxima Centauri, que se encontra a uma distância 270 mil vezes maior, assim sua luz demora 4 anos e 4 meses para chegar até nós! Pela sua proximidade, podemos estudar o Sol melhor do que qualquer outra estrela do Universo. Mais detalhes sobre a estrutura do Sol são apresentados no Capítulo 4.

3.3.2 OS PLANETAS E SEUS SATÉLITES

Ao observarem continuamente o céu, os antigos perceberam a existência de pelo menos dois tipos de objetos. Enquanto a imensa maioria dos pontinhos brilhantes no céu, as estrelas, possuía posições relativas imutáveis, alguns poucos pontos pareciam passear por entre elas. Esses objetos foram chamados planetas, que em grego significa errante. São cinco os planetas observáveis a olho nu: Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno. A Lua também foi considerada um astro errante, mas hoje sabemos que não é um planeta, pela definição atual. A Lua é hoje considerada um satélite. Enquanto um planeta orbita em torno do Sol, um satélite orbita em torno de um planeta. Porém, do ponto de vista de composição e características físicas, os planetas e satélites podem ser muito parecidos em alguns casos.

Ao redor do Sol orbitam nove planetas conhecidos. Em ordem de proximidade média ao Sol são eles: Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Netuno e Plutão. Algumas de suas características orbitais são listadas na Tabela 3.2.

Os planetas podem ser divididos em dois tipos: planetas telúricos (similares à Terra) e planetas jovianos (similares a Júpiter). Os planetas telúricos são: Mercúrio, Vênus, Terra e Marte. Os jovianos são: Júpiter, Saturno, Urano e Netuno. Plutão não se enquadra em nenhuma das categorias acima e, como veremos adiante, parece um grande cometa.

Os planetas telúricos são pequenos, de baixa massa e compostos basicamente por elementos pesados. São também chamados de planetas internos por serem os mais próximos ao Sol. Possuem poucos ou nenhum satélite e são desprovidos de anéis. A superfície é sólida e a atmosfera é tênue, comparada com a massa do planeta. Os planetas telúricos apresentam ou apresentaram atividade vulcânica, causando modificações importantes em sua estrutura interna e na superfície.

TABELA 3.2 - ALGUNS DADOS ORBITAIS DOS PLANETAS (FONTE: NSSDC).

Planeta	Semi-eixo maior da órbita*	Excentricidade da órbita**	Período de translação (Anos)	Período de rotação (Dias)	Inclinação da órbita (Graus)
Mercúrio	0,387	0,2056	0,241	58,785	7,0
Vênus	0,723	0,0067	0,615	243,7	3,39
Terra	1,000	0,0167	1,0	1,0	0,0
Marte	1,524	0,0935	1,881	1,029	1,85
Júpiter	5,204	0,0489	11,862	0,415	1,304
Saturno	9,582	0,0565	29,457	0,439	2,485
Urano	19,201	0,0457	84,011	0,720	0,772
Netuno	30,047	0,0113	164,79	0,673	1,769
Plutão	39,24	0,2444	247,68	6,4047	17,16

* O semi-eixo maior da órbita refere-se ao valor relativo ao terrestre.

** Veja Seção 3.4 para definição de excentricidade.

Os planetas jovianos são grandes em dimensão e massa, como Júpiter. Este, por sua vez, é o que mais guarda relação com o Sol. Sua massa está próxima à das menores estrelas. Se esta fosse um pouco maior, o processo de fusão nuclear poderia ocorrer em seu interior e ele seria uma estrela. Os planetas jovianos, também chamados gigantes, são compostos basicamente por hidrogênio e hélio. Por isso, apesar de sua grande massa, são menos densos. Não possuem superfície sólida e sua atmosfera densa. Possuem tipicamente muitos satélites e todos exibem anéis.

A existência de uma atmosfera depende da massa do planeta e de sua temperatura. Esta, por sua vez, depende inicialmente da sua distância ao Sol. Os planetas menores e mais quentes (mais próximos do Sol) têm mais dificuldade em manter uma atmosfera. Por outro lado, os elementos mais leves escapam mais facilmente do planeta. Assim, os planetas telúricos tendem a reter quase que somente elementos mais pesados em sua atmosfera. Já os planetas gigantes conseguem reter uma maior quantidade de material,

inclusive os elementos mais leves. A atmosfera faz diminuir a variação de temperatura na superfície entre o dia e a noite.

Na tabela anterior, os valores de massa referem-se à razão entre a massa do planeta e a da Terra. O mesmo vale para o raio equatorial. O achatamento corresponde à diferença entre os raios equatorial e polar do planeta, em unidades de raio equatorial. Os valores para a Terra podem ser encontrados na Tabela 3.4.

TABELA 3.3 - ALGUNS DADOS FÍSICOS DOS PLANETAS (FONTE: NSSDC).

Planeta	Massa*	Raio Equatorial*	Achatamento
Mercúrio	0,0553	0,383	0,0
Vênus	0,815	0,950	0,0
Terra	1,000	1,000	0,0034
Marte	0,107	0,532	0,0065
Júpiter	317,83	11,21	0,0649
Saturno	95,162	9,449	0,0980
Urano	14,536	4,007	0,023
Netuno	17,147	3,883	0,0171
Plutão	0,0021	0,187	0

* Valor relativo ao terrestre.

Os planetas, de modo geral, não possuem luz própria. A maior parte da energia que irradiam corresponde à luz do Sol que é refletida em sua superfície. Assim, como um farol de bicicleta, tipo olho de gato, parece aceso quando alguma luz incide sobre ele. Porém, existe um pequeno excesso de energia (com relação à recebida pelo Sol) que pode ser de origem gravitacional ou radioativa. Esse excesso é maior nos planetas jovianos.

Apesar de pequena, a energia interna dos planetas telúricos é suficiente para modificar sua aparência através de atividade geológica: vulcanismo e movimentos tectônicos. Outros mecanismos que determinam a aparência da crosta de um planeta ou satélite são:

a erosão, causada pela atmosfera ou hidrosfera; e o crateramento. Este último ocorre em todos os planetas internos e satélites de superfície sólida. Desse modo, a análise da crosta permite determinar a época de formação de um dado terreno e o estado atual de atividade do corpo, como veremos ao descrevermos alguns planetas.

3.3.2.1 MERCÚRIO

Mercúrio é o planeta mais próximo do Sol. Seu nome latino corresponde ao do deus grego Hermes, filho de Zeus. Bastante pequeno, é o segundo menor entre todos os planetas (veja Tabela 3.3). Sua superfície está coberta por crateras resultantes do impacto de corpos menores. Por isso supõe-se que a atividade vulcânica tenha ocorrido apenas no início, até cerca de 1/4 da sua idade atual. Caso houvesse atividade recente, as lavas cobririam e apagariam as crateras. Das inúmeras crateras existentes, destaca-se a Bacia Caloris, com 1.300 quilômetros de diâmetro, quase 1/3 do diâmetro do planeta.



FIGURA 3.4 – MOSAICO DE IMAGENS DO PLANETA MERCÚRIO OBTIDAS COM A SONDA MARINER 10 (NSSDC).

Possui uma atmosfera muito tênue, quase desprezível, por isso existe uma incrível variação da temperatura entre o dia e a noite: de -170 graus (lado oculto do Sol) a $+430$ graus centígrados (lado iluminado pelo Sol). Compare com a Terra, onde a variação é de poucas dezenas de graus. Sua órbita é altamente excêntrica, só Plutão o supera nesse aspecto.

3.3.2.2 VÊNUS

Vênus é o nome latino da deusa grega do amor, Afrodite. Facilmente identificável no céu, esse planeta é também chamado de Estrela D'Alva ou estrela matutina - mas ele não é uma estrela! É o mais brilhante dos planetas e está sempre próximo ao Sol, como Mercúrio, pois suas órbitas são internas à da Terra. Enquanto Mercúrio é bastante pequeno (2/5 da Terra), Vênus já possui um tamanho comparável ao da Terra. Aliás, esse planeta é bastante parecido com o nosso, em massa e composição química. Apesar dessas similaridades, entretanto, sua atmosfera é bastante diferente da terrestre.

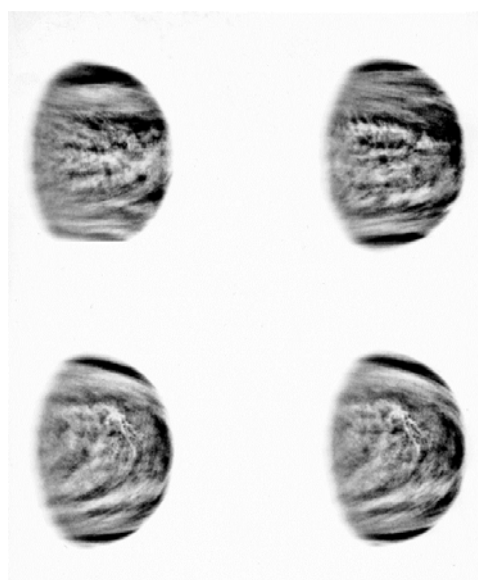


FIGURA 3.5- O PLANETA VÊNUS OBSERVADO PELA SONDA GALILEO (NSSDC).

A atmosfera de Vênus é bastante espessa e reflete a maior parte da luz solar incidente. Essa é a razão do seu grande brilho. Sua atmosfera também impede a observação direta da superfície do planeta. O raio de Vênus somente pode ser determinado com o uso de radares ou de sondas espaciais. Por ter um tamanho relativamente grande, seu manto é convectivo, pois não consegue dissipar o calor interno por condução, como acontece com Mercúrio (veja o quadro sobre as formas de transporte de energia). A convecção levou gases para a superfície, de modo a formar uma atmosfera composta basicamente por gás carbônico, CO_2 - quase 97 % - e gás nitrogênio, N_2 - 3 %. O gás carbônico é

responsável pela ocorrência do efeito estufa (veja quadro a seguir), que eleva a temperatura na superfície a 460°C. Note que essa temperatura chega a superar a de Mercúrio que está mais próximo do Sol e esperaríamos que fosse mais quente. As nuvens de Vênus são formadas por várias substâncias, entre elas o ácido sulfúrico. A pressão atmosférica de Vênus é bastante alta, cerca de 100 vezes maior que a da Terra. Existem também evidências de vulcanismo, que está relacionado ao manto convectivo. Por tudo isso, a superfície de Vênus possui condições bem inóspitas.

EFEITO ESTUFA

O Sol emite a maior parte de sua energia na forma de luz visível. Essa radiação ao atingir a superfície de um planeta é transformada em radiação infravermelha. O efeito estufa é produzido por certos gases na atmosfera, em especial o gás carbônico. A absorção da radiação por esses gases é maior na região infravermelha do que na região visível. Assim, mais radiação visível do Sol atravessa a atmosfera e alcança a superfície do planeta do que radiação infravermelha escapa para o espaço, o que faz com que parte da energia fique retida entre a atmosfera e a superfície do planeta. O resultado é que a atmosfera próxima à superfície fica aquecida. Esse efeito é similar ao que acontece nos carros. A luz visível entra pelo vidro e é transformada em radiação infravermelha, que o vidro não deixa escapar. Assim, o interior do carro aquece-se. É o que acontece com Vênus, e também com a Terra, por motivos naturais. Mas, nos últimos 150 anos a temperatura na Terra está crescendo, e isto pode ser devido ao aumento, causado pelo homem, da concentração dos gases responsáveis pelo efeito estufa.

Vênus possui rotação retrógrada, isto é, ele gira em sentido contrário ao da maior parte dos movimentos do sistema solar. É também o único planeta em que o tempo de rotação (243 dias) supera o de translação em torno do Sol (225 dias). Assim, o dia em Vênus dura mais que o ano!

3.3.2.3 A TERRA

Terra é o nome da deusa romana, esposa do Céu. Como já vimos, o planeta em que vivemos era considerado até o Renascimento como em posição privilegiada, em torno da qual o Universo existia. Com o avanço do nosso conhecimento, a Terra deixou de ocupar um lugar especial e passou a ser apenas mais um dos planetas de uma estrela comum, o Sol. Porém, ainda hoje é considerada particular, pela existência e complexidade da vida em sua superfície. A temperatura na Terra é tal que permite que a água exista no estado líquido*. Aliás, o nosso planeta deveria ser chamado de planeta Água e não Terra, pois 3/4 de sua superfície são cobertos pela água. Apenas para se ter uma idéia da quantidade de água dos oceanos, se a superfície do planeta se aplainasse, o planeta seria coberto por um oceano de 400m de profundidade. A água é um dos fatores essenciais que levou à existência da vida.

A atmosfera terrestre é formada basicamente por nitrogênio (78 %), que faz com que o nosso planeta seja azul quando visto de fora. Existem, porém, outros gases. Entre eles devemos salientar o oxigênio (20 %) e o ozônio, que bloqueiam a radiação ultravioleta do Sol, que é fatal para alguns microorganismos e prejudicial para os seres vivos em geral. O oxigênio da atmosfera terrestre é basicamente produzido pelas plantas, através da fotossíntese. Hoje, a atmosfera possui uma pequena quantidade de gás carbônico, porém ela já deve ter sido muito maior, mas foi consumida por vários processos. Assim, atualmente o efeito estufa é muito menor na Terra do que é em Vênus.

A Terra é um planeta bastante ativo geologicamente: possui vulcanismo e movimentos tectônicos importantes resultantes da convecção do manto interno à crosta.

O nosso planeta possui um satélite, a conhecida Lua. Sua superfície é coberta por crateras de impacto, principalmente na face oposta à Terra. Observa-se também os mares (regiões escuras) e montanhas (regiões claras). Os mares são grandes regiões preenchidas por lava solidificada. Porém, não há indícios de atividade vulcânica atual. Como não possui atmosfera significativa, sua temperatura é basicamente regida pela radiação solar, com grandes diferenças entre o dia e a noite.

* Além da Terra, é possível que Europa, um dos satélites Galileanos de Júpiter, possua água no estado líquido sob uma crosta de gelo.



FIGURA 3.6- MOSAICO DE IMAGENS DO PLANETA TERRA OBTIDAS COM A SONDA CLEMENTINE (NSSDC).

A Lua é um satélite relativamente particular dentro do sistema solar, pois possui um tamanho comparável ao da Terra. Sua massa é apenas 80 vezes menor que a da Terra. Ganimedes, por exemplo, é um dos satélites de Júpiter e sua massa é 10.000 vezes menor que a do planeta. O tamanho da Lua é apenas 1/4 do da Terra. Assim, do ponto de vista físico, o conjunto Terra-Lua poderia ser definido como um sistema binário.

Entre as possíveis teorias para explicar a formação lunar, existe a de formação conjunta com a Terra e posterior separação, captura, ou mesmo formação inicial em separado. A teoria mais aceita atualmente diz que a Terra sofreu o impacto de um objeto de massa muito alta (como Marte, por exemplo) e nesse processo uma parte da Terra foi ejetada e formou a Lua.



FIGURA 3.7 – IMAGEM DA LUA CHEIA OBTIDA PELA APOLLO 11 (NSSDC).

TABELA 3.4 - ALGUNS DADOS DA TERRA E DA LUA (FONTE: NSSDC).

Parâmetros	Terra	Lua
Massa	$5,9736 \cdot 10^{24}$ kg	0,0123 $Massa_{Terra}$
Raio equatorial	6378 km	0,2724 $Raio_{Terra}$
Achatamento	0,0034	0
Semi-eixo maior da órbita	149,6 milhões de quilômetros	384.400 quilômetros
Período orbital	365,256 dias	27,322 dias
Inclinação da órbita	0 graus	5,1 graus
Excentricidade da órbita	0,0167	0,0549
Período de rotação	23,9345 horas	655,7 horas (27,32 dias)

3.3.2.4 MARTE

Marte é o planeta telúrico mais distante do Sol. Seu nome refere-se ao deus latino da guerra, cujo correspondente grego é Ares. Possui uma atmosfera tênue, cujo

componente principal é o gás carbônico (95 %). Sua cor avermelhada é devida à poeira que cobre parcialmente a sua superfície. Parte desta é recoberta por lava solidificada, formando grandes planícies. Mas existem também crateras de impacto e montanhas. A maior montanha do sistema solar está em Marte. É o monte Olimpo, um vulcão extinto, que possui 25 km da base ao topo! Devem ter ocorrido processos de convecção em algum momento do passado, mas como Marte é um planeta pequeno, esses processos cessaram e atualmente seu calor é dissipado por condução. A temperatura na superfície oscila entre -90 e 30 graus centígrados.

Marte possui dois satélites, Fobos e Deimos (em grego, Medo e Terror), cujos nomes representam os dois filhos do deus da guerra, Ares, na mitologia grega. São pequenos, da ordem de 10 quilômetros de raio, e possuem forma irregular, como a de uma batata. São provavelmente asteróides (veja a Seção 3.3.4), capturados pela gravidade do planeta.



FIGURA 3.8 – IMAGEM DO PLANETA MARTE OBTIDA COM O HUBBLE SPACE TELESCOPE (STSCI).

3.3.2.5 JÚPITER

Júpiter é o maior planeta do sistema solar, sendo seu raio cerca de 11 vezes maior que o da Terra. É o protótipo dos planetas jovianos, os gigantes gasosos. Coincidentemente, o seu nome latino corresponde em grego a Zeus, o maior dos deuses do Olimpo. Apesar de possuir, provavelmente, um núcleo formado por materiais pesados, ele é composto basicamente por hidrogênio e hélio na forma gasosa. Assim, Júpiter, como os demais planetas jovianos, não possui uma superfície sólida como os planetas terrestres.

Sua atmosfera é também formada por hidrogênio e hélio. Ela é bastante espessa e determina a aparência do planeta. A imagem de Júpiter mostra uma série de bandas coloridas paralelas ao seu equador, que correspondem a nuvens de diferentes movimentos, temperatura e composição química. Uma estrutura bastante interessante é a chamada *Grande Mancha Vermelha*. Como as bandas, ela também corresponde a um fenômeno meteorológico, por assim dizer. Ela é muito grande (10.000 x 25.000 quilômetros), muito maior que a Terra, por exemplo. É uma estrutura bastante estável, no sentido de que persiste há muito tempo.

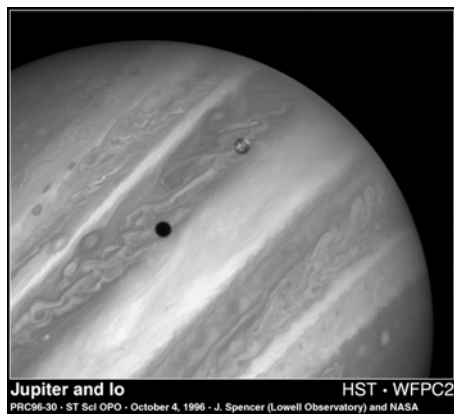


FIGURA 3.9 – IMAGEM DO PLANETA JÚPITER E SEU SATÉLITE IO OBTIDA PELO HUBBLE SPACE TELESCOPE (STScI).

Hoje conhecemos 61 satélites de Júpiter, mas esse número continua a crescer em virtude de novas descobertas. Entretanto, quatro deles destacam-se por seu tamanho: Io, Europa, Ganímedes e Calisto. São chamados satélites galileanos, pois foram descobertos por Galileu, no início do século XVII. Ganímedes é o maior satélite do

sistema solar. Io e Europa são similares aos planetas telúricos, formados basicamente por rochas. Io possui vulcões ativos e Europa uma atmosfera de oxigênio, além de um possível oceano de água líquida sob uma crosta de gelo. De todos os satélites do sistema solar, apenas 5 possuem atmosferas: Europa, Io, Ganimedes, Titã (Saturno) e Tritão (Netuno).

Além dos satélites, Júpiter possui um anel, como os demais planetas jovianos. Esse anel é bastante fino e escuro, diferente do de Saturno, que é bastante brilhante e define a aparência do planeta.

Júpiter emite mais energia do que recebe do Sol e este excesso deve ser de origem gravitacional.

3.3.2.6 SATURNO

O nome desse planeta vem do deus romano que ensinou aos homens a agricultura, e é por alguns associado ao deus grego Cronus. Saturno é o segundo maior planeta do sistema solar. É similar a Júpiter em vários aspectos, como na estrutura interna e atmosfera. Também possui bandas atmosféricas que, porém, são menos contrastantes entre si que as de Júpiter. Também, como Júpiter, possui uma pequena fonte de calor interna.



FIGURA 3.10 – IMAGEM DO PLANETA SATURNO OBTIDA PELA VOYAGER 2 (NASA).

Saturno possui um belo sistema de anéis que é visível através de uma pequena luneta. Dizemos um sistema, pois o disco que vemos em torno de Saturno corresponde a pelo

menos sete anéis. Os anéis são compostos por partículas de gelo e poeira, cujos tamanhos vão desde um milésimo de milímetro até dezenas de metros. Apesar de sua grande extensão - o raio externo fica a 480 000 quilômetros do centro de Saturno -, os anéis são extremamente finos, da ordem de duzentos metros. Para se ter uma idéia dessa proporção, imagine um disco do tamanho de um quarteirão com uma espessura de aproximadamente um centésimo de milímetro! Enquanto os anéis de Saturno são conhecidos há bastante tempo, os anéis dos demais planetas jovianos só foram descobertos na década de 70.

Saturno possui ao menos 31 satélites. Um satélite bastante peculiar é Titã. É o segundo maior satélite do sistema solar. Possui um núcleo rochoso, recoberto por um manto de gelo de compostos orgânicos. Sua espessa atmosfera é formada principalmente por nitrogênio e contém também moléculas orgânicas complexas, estrutura que se supõe ser similar à atmosfera terrestre primitiva. A temperatura máxima na superfície de Titã é de -100 graus centígrados.

3.3.2.7 URANO

Até agora falamos apenas de planetas conhecidos desde a Antigüidade. Urano foi o primeiro dos planetas a serem descobertos na era moderna, em 1781, pelo astrônomo inglês de origem alemã William Herschel (1738-1822). Urano, cujo nome refere-se ao deus grego que personifica o céu, deve possuir um núcleo rochoso similar ao da Terra recoberto por um manto de gelo. Assim, ele é diferente de Júpiter e Saturno na estrutura interna. Sua atmosfera é composta basicamente por hidrogênio e hélio, mas contém também um pouco de metano. Possui também bandas atmosféricas, como os demais planetas jovianos.

Urano possui uma anomalia no que tange ao seu eixo de rotação, que está muito próximo do plano orbital, isto é, o seu eixo é praticamente perpendicular ao dos demais planetas. Supõe-se que isso se deva ao efeito de um grande impacto. Como ele possui um sistema de anéis como, estes são observados de frente e não lateralmente como os de Saturno, por exemplo.

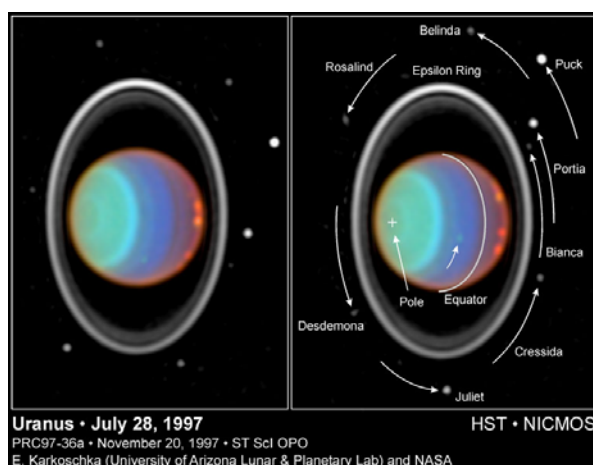


FIGURA 3.11 - O PLANETA URANO COM SEU DISCO E SATÉLITES. IMAGEM OBTIDA COM O HUBBLE SPACE TELESCOPE (STScI).

Esse planeta possui 26 satélites conhecidos, todos compostos principalmente por gelo. Dentre suas maiores luas, a mais próxima de Urano é Miranda. Ela possui um relevo bastante particular, formado por vales e despenhadeiros.

3.3.2.8 NETUNO

Logo após a descoberta de Urano, foi notado que os cálculos matemáticos não reproduziam com exatidão a sua órbita. Foi então sugerido que existiria um outro planeta, cuja influência gravitacional era a responsável pelos desvios de sua órbita. Em 1845, o jovem matemático inglês John C. Adams (1819-1892) e pouco depois o astrônomo francês Urbain Le Verrier (1811-1877) previram a existência de Netuno, que foi, então, observado pelo astrônomo alemão Johann G. Galle (1812-1910) e H. L. d'Arrest em 1846. O fato de que Netuno não foi descoberto, mas sim previsto, é considerado uma grande vitória da ciência.

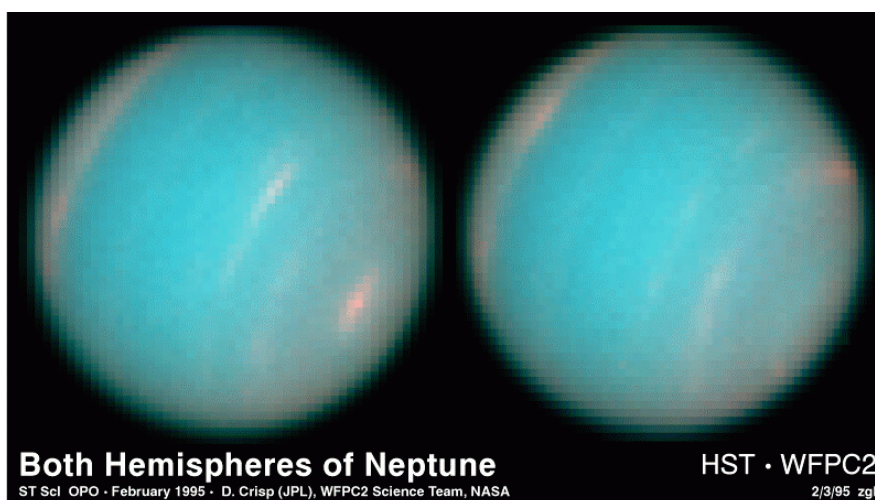


FIGURA 3.12 – IMAGENS DOS DOIS HEMISFÉRIOS DO PLANETA NETUNO OBTIDAS COM O HUBBLE SPACE TELESCOPE (STSCI).

Netuno é o nome latino de Possêidon, o deus grego dos mares. Possui uma estrutura interna muito similar a Urano, sendo formado por rochas e gelo. Apresenta uma atmosfera espessa com bandas atmosféricas. Possui 13 satélites e um sistema de anéis. Dentre seus satélites, destaca-se Tritão. É um satélite ativo possuindo os chamados vulcões de gelo. Dentre todos os corpos do sistema solar, a atividade vulcânica só está presente na Terra, Vênus, Io e Tritão.

3.3.2.9 PLUTÃO

Plutão - o último dos planetas do sistema solar - foi descoberto em 1930, pelo americano Clyde Tonbaugh. Plutão, na mitologia, é o deus romano do mundo dos mortos, mundo este chamado de Hades pelos gregos. Sua órbita é tão excêntrica, que sua distância ao Sol pode variar em 40%. Devido a isso, sua órbita e a de Netuno se interceptam, de modo que em algumas situações Netuno passa a ser o planeta mais afastado do Sol. Plutão é o menor dos planetas, sendo menor até que a nossa Lua. Sua distância e tamanho tornam bastante difícil sua observação, assim algumas das informações que temos sobre esse planeta são ainda incertas. Deve ser composto de rochas (70 %) e gelo de compostos orgânicos (30 %). Parece apresentar uma pequena atmosfera de Nitrogênio, monóxido de carbono e metano (CH₄).



FIGURA 3.13 – IMAGEM DO PLANETA PLUTÃO E SEU SATÉLITE CARONTE OBTIDA COM O HUBBLE SPACE TELESCOPE (STSCI).

Plutão possui um satélite, Caronte - nome do barqueiro, que na mitologia grega, atravessa o rio levando as almas para o Hades. Descoberto apenas em 1978, é um pequeno satélite, de composição e tamanho comparáveis ao de Plutão: o raio de Caronte é aproximadamente metade o de Plutão. Assim, pode-se considerar que ambos formam um sistema duplo de planetas.

3.3.2.10 EXISTEM OUTROS PLANETAS NO SISTEMA SOLAR?

Recentemente foram descobertos muitos corpos com órbitas similares à de Plutão. Esses objetos são chamados de transnetunianos. Eles são parecidos com Plutão, mas são menores – até o momento não foi encontrado nenhum maior que Plutão. A região onde se concentram esses objetos é chamada de Cinturão de Kuiper e se situa cerca de 50 vezes mais distante do Sol que a Terra. Por vezes a descoberta de um novo objeto desse tipo é alardeada como a descoberta de um novo planeta, o que não é correto: eles são asteróides ou cometas. Por outro lado, alguns pesquisadores argumentam que Plutão não é corretamente classificado como um planeta, mas sim como o maior dos objetos transnetunianos. Entretanto, a União Astronômica Internacional – o mais alto órgão da astronomia mundial - ainda classifica Plutão como planeta.

3.3.3 ASTERÓIDES

Apesar do nome de origem grega que significa “similar a estrelas”, os asteróides são mais parecidos aos planetas, apesar de muito menores. Concentram-se, em sua maioria,

em um anel entre as órbitas de Marte e Júpiter. Imagine o que aconteceria se um planeta fosse quebrado em milhares de pedacinhos e esses pedacinhos fossem espalhados ao longo de sua órbita. Um cinturão de asteróides é aproximadamente isso. Porém, os asteróides não devem ser o resultado de um processo destrutivo, mas, sim, um planeta que não deu certo. Como veremos mais adiante os planetas devem ter sido formados aos poucos, a partir da aglutinação de pedaços menores.

O diâmetro dos asteróides pode chegar a centenas de quilômetros. O maior deles, Ceres, tem um diâmetro de 974 quilômetros. Os grandes asteróides são esféricos, mas os menores podem possuir formas irregulares (como a de batatas). A maior parte deles são formados basicamente por rochas (silicatos). Porém, alguns podem ser metálicos (ferro).

3.3.4 COMETAS

O sistema solar não abrange apenas o Sol, os planetas, seus satélites e asteróides. Os cometas pertencem também ao sistema solar e, como os planetas, orbitam em torno do Sol. Porém, suas órbitas não se restringem ao plano do sistema solar, que contém as órbitas dos planetas. As órbitas dos cometas possuem inclinações as mais variadas, com excentricidades bastante altas e raios muito grandes, maiores que os dos planetas mais distantes. Quanto à sua composição, o núcleo de um cometa é um aglomerado de matéria sólida: grãos de poeira e gelo de materiais orgânicos. Quando um deles se aproxima do Sol, o material de sua superfície sublima, formando uma nuvem de gás e poeira ao seu redor. Essa é a chamada coma. O movimento do cometa, em combinação com a ação do vento solar, forma duas caudas: a de gás e a de poeira.

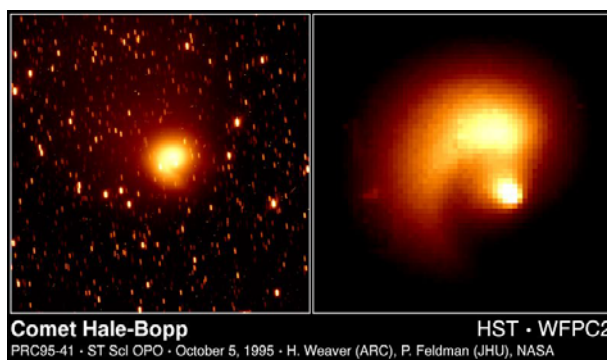


FIGURA 3.14 – IMAGENS DO COMETA HALE-BOPP OBTIDAS COM O HUBBLE SPACE TELESCOPE (STSCI).

Hoje se acredita que os cometas são resquícios da época da formação do sistema solar. Sua composição deve ser a mesma da nuvem primordial que deu origem ao Sol e aos planetas (veja a Seção 3.5). Mas, de onde vêm os cometas? Provavelmente de uma região bastante afastada do sistema solar chamada Nuvem de Oort, idealizada pelo holandês Jan H. Oort. Supõe-se que ela seja uma nuvem de gás, poeira e cometas que circunda todo o sistema solar, formando uma casca esférica. Os cometas concentram-se nessa região e, ocasionalmente, são perturbados e suas órbitas modificam-se de modo a passar próximo ao Sol: nessa situação eles tornam-se visíveis.

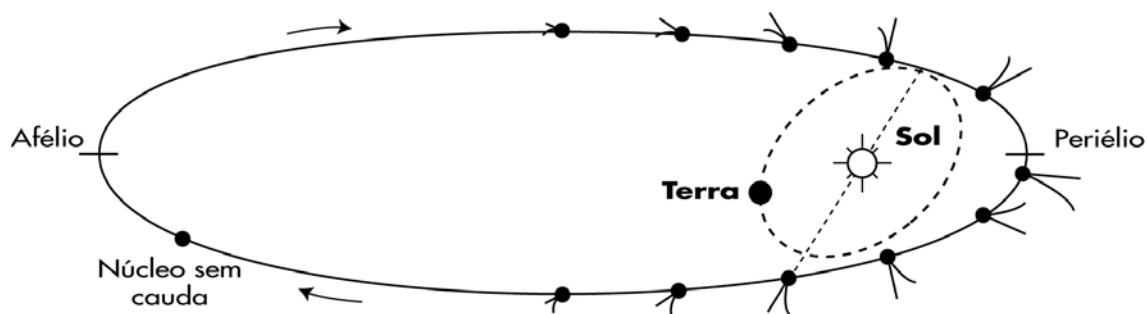


FIGURA 3.15 - UM EXEMPLO DE ÓRBITA DE COMETA.

3.3.5 METEOROS. METEORITOS E METEORÓIDES

Qual a diferença entre meteoro, meteoróide e meteorito? Um meteorito é um objeto sólido que atingiu a superfície terrestre. O meteoro é o fenômeno que ocorre quando um corpo entra na atmosfera terrestre e deixa um rastro luminoso provocado pelo atrito - são as chamadas estrelas cadentes. O corpo que entra na atmosfera é o meteoróide.

Os meteoróides são fragmentos de cometas ou asteróides. Os menores são desintegrados pelo atrito com a atmosfera e apenas os maiores podem chegar à superfície da Terra. Esses meteoritos são, em sua maior parte, originários de asteróides.

Os cometas deixam atrás de si rastros de poeira que formam tubos com diâmetros da ordem de 10 a 50 milhões de km!! Se a Terra atravessa um desses anéis de poeira, ocorre a chamada chuva de meteoros. É por isso que existem determinadas épocas do ano para que isso ocorra: é quando a Terra atravessa o rastro de um cometa importante.



FIGURA 3.16 – METEORITO DE UM FRAGMENTO DO ASTERÓIDE VESTA (NASA).

Hoje a teoria mais aceita para a extinção dos dinossauros é a de um impacto de um meteorito ocorrido no México, próximo à Península de Yucatan, por volta de 65 milhões de anos atrás. Segundo pesquisas recentes, esse meteorito teria um diâmetro de cerca de 10 km. A cratera formada teria entre 200 a 250 quilômetros de diâmetro, e é denominada Cratera de Chicxulub. O choque teria levantado uma enorme quantidade de poeira, que teria bloqueado os raios solares e levado ao resfriamento drástico da superfície terrestre por vários meses. Isso teria provocado a morte das plantas e dos animais que delas se alimentavam. A energia estimada para esse impacto corresponde a cinco bilhões de bombas nucleares como a que foi lançada em Hiroshima.

3.4 OS MOVIMENTOS NO SISTEMA SOLAR

Como vimos logo no início deste capítulo, os corpos do sistema solar destacaram-se entre as estrelas fixas devido aos seus movimentos. A *cinemática* é a área da Física que descreve os movimentos sem se preocupar com o que os causa. No caso do sistema solar, os movimentos dos planetas foram descritos por Kepler através de três leis que enumeramos abaixo. Mais tarde, Newton explicou esses movimentos considerando as

forças que agem sobre os corpos: a área da Física que estuda as forças que determinam o movimento de um corpo é chamada *dinâmica*. A força em questão é a gravitacional.

3.4.1 AS LEIS DE KEPLER

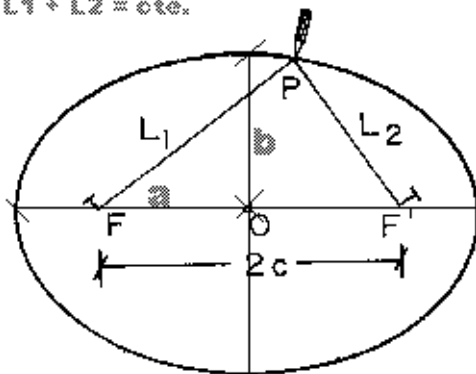
No início do século XVII, Kepler derivou três leis empíricas que descrevem o movimento dos planetas. As duas primeiras foram determinadas simultaneamente (1609) e são o resultado de sua tentativa de descrever corretamente os movimentos planetários. A terceira lei, determinada dez anos mais tarde (1619), relaciona os períodos e tamanhos das órbitas e, de certa forma, traduz uma certa harmonia entre os movimentos dos corpos, o que talvez fosse o principal objetivo de Kepler.

- Primeira Lei – Lei das órbitas elípticas: A órbita de um planeta é uma elipse (veja quadro adiante) com o Sol em um dos focos. Assim, as distâncias entre um planeta e o Sol são variáveis ao longo da translação do planeta.

DEFININDO UMA ELIPSE

Uma elipse é o conjunto de pontos cuja soma das distâncias, L_1 e L_2 , a dois pontos fixos, F e F' , chamados focos, é uma constante.

$$L_1 + L_2 = \text{cte.}$$



A excentricidade, e , de uma elipse é definida como:

$$e = \frac{c}{a}.$$

A circunferência é uma elipse de excentricidade zero. Assim, $F = F' =$ centro da circunferência. Nesse caso, também, $L_1 = L_2 =$ Raio da circunferência.

- Segunda Lei - Lei das áreas: Ao longo de sua órbita, um planeta possui uma velocidade variável, de modo que a área coberta pela linha que liga o Sol ao planeta é sempre a mesma em intervalos de tempo iguais (Fig. 4.17).

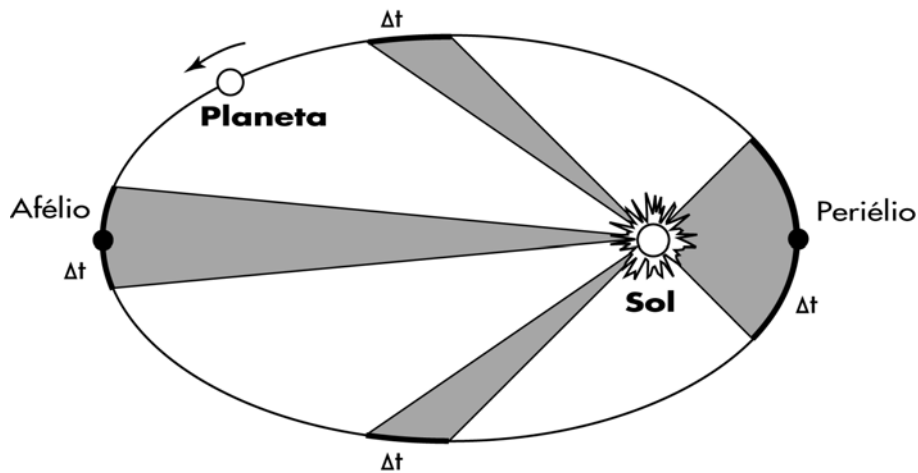


FIGURA 3.17 - LEI DAS ÁREAS.

- Terceira Lei – Lei Harmônica: A razão entre o quadrado do período de translação, P , de um planeta e o cubo do semi-eixo maior de sua órbita, a , é a mesma para todos os planetas:

$$\frac{a^3}{P^2} = K$$

3.4.2 A LEI DE TITIUS-BÖDE

No século XVIII, dois astrônomos alemães, Titius e Johann Bode (1747-1826), descobriram que as distâncias, D , dos planetas ao Sol podem ser descritas por uma lei com a forma abaixo:

$$D_n = 0.4 + 0.3 * 2^n,$$

onde a distância D é dada em relação à distância Sol-Terra e n possui os valores de $-\infty$ para Mercúrio, 0 para Vênus, 1 para a Terra, 2 para Marte e assim sucessivamente. O número 3 corresponde ao cinturão de asteróides entre as órbitas de Marte e Júpiter. Na época da publicação dessa lei, ainda não se conheciam os planetas não visíveis a olho nu. A Tabela 3.5 mostra uma comparação entre a Lei de Titius-Böde e os valores atuais.

TABELA 3.5 – LEI DE TITIUS-BÖDE

Planeta	n	Lei de Titius-Böde	Observado
Mercúrio	$-\infty$	0,4	0,387
Vênus	0	0,7	0,723
Terra	1	1,0	1,000
Marte	2	1,6	1,524
Asteróides	3	2,8	
Júpiter	4	5,2	5,204
Saturno	5	10,0	9,582
Urano	6	19,6	19,201
Netuno	7	38,8	30,047
Plutão	8	77,2	39,24

Ainda não existe uma explicação para essa relação. Assim, não se sabe se é uma simples coincidência matemática ou se está realmente ligada ao processo de formação/estabilidade do sistema solar.

3.5 A FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

O Universo conhecido é basicamente vazio. A matéria concentra-se em pequenas regiões. Isto é, o Universo possui uma certa estrutura. Exatamente como o homem não ocupa uniformemente toda a superfície terrestre, a matéria não se distribui igualmente no Universo. A matéria tende a se concentrar nas galáxias, como o homem tende a se concentrar nas cidades - entenda o que são galáxias no Capítulo 6.

A galáxia em que vivemos chama-se Via Láctea. As estrelas que formam a Via Láctea formam a faixa esbranquiçada, de aparência leitosa, que pode ser vista em noites escuras de inverno. O Sol é apenas uma das bilhões de estrelas que existem na Via Láctea. O planeta mais distante encontra-se muito mais perto que a estrela mais próxima. Plutão encontra-se a 4 horas-luz, enquanto que a estrela mais próxima está a mais de 4 anos-luz.

Em galáxias do tipo da nossa Via Láctea, que é uma galáxia espiral (veja o que é uma galáxia e como são no Capítulo 6), existem nuvens de matéria na região equatorial. Essas nuvens não são como as da nossa atmosfera, que são basicamente compostas por água, mas aglomerados de gás e poeira. As estrelas, de modo geral, e o nosso sistema solar, em particular, tiveram sua origem em uma nuvem desse tipo. Isto é, o Sol nasceu e foi formado em uma dessas nuvens.

A composição química dessa nuvem é basicamente a mesma do Sol e do Universo, preponderantemente hidrogênio. Os elementos mais pesados existem em uma quantidade muito menor. A tendência é que os elementos mais pesados sejam menos abundantes que os elementos mais leves nos corpos celestes - exceção feita a alguns corpos celestes, entre eles a Terra.

O modelo mais aceito atualmente para a formação do sistema solar considera que o sistema solar como um todo (Sol, planetas, etc.) surgiu a partir de uma mesma nuvem de gás e poeira: a Nebulosa Solar Primitiva. Em algum momento, essa nuvem começou a se contrair devido à autogravidade. O estopim de um processo desse tipo pode ter sido a explosão de uma estrela chamada supernova (leia sobre supernovas no Capítulo 5 sobre estrelas). Essa explosão fez com que o equilíbrio gravitacional da nuvem acabasse, e assim começasse a sua contração. Poderíamos dizer que assim foi a concepção do sistema solar. O colapso gravitacional pode ter ocorrido naturalmente, também.

Assim, o sistema solar em seu início, há cerca de 4,6 bilhões de anos atrás, era muito diferente do que é hoje. Ele evoluiu, como os seres vivos evoluem ao longo de sua vida, porém, de maneira completamente diversa.

Inicialmente, o Sol não era uma estrela exatamente como é hoje, com fusão de energia em seu interior. Os planetas também não existiam. Existia apenas uma concentração de

massa central e um disco de matéria em torno dela. Enquanto a concentração de massa central evoluía para o que é o nosso Sol atualmente, o disco estruturava em anéis. Eles iriam transformar-se nos planetas. Um dos anéis não deu origem a um planeta, mas continua até hoje como um anel. É o chamado cinturão de asteróides, entre as órbitas de Marte e Júpiter.

Como um anel de matéria em torno do Sol transforma-se em planeta? O gás e poeira presente nesses anéis colidem e formam pequenos aglomerados de matéria, chamados planetesimais. Esses planetesimais, por sua vez, também podem colidir e na colisão pode ocorrer liberação de calor. Esse calor pode ser usado para derreter os planetesimais e assim "grudá-los".

Do colapso inicial da nuvem até o início da condensação dos planetas o intervalo de tempo deve ser da ordem de 10 milhões de anos. Até que o Sol se torne uma estrela transcorrem-se 50 milhões de anos. Para chegar ao estágio final de um sistema planetário deve transcorrer 1 bilhão de anos. O sistema solar deve ter cerca de 5 bilhões de anos de idade.

Toda a teoria exposta acima está de acordo com as características gerais do sistema solar. Algumas delas são: (1) os planetas se encontram aproximadamente em um mesmo plano que é o plano equatorial do Sol; (2) as órbitas são quase circulares; (3) grande parte das rotações é prógrada.

A teoria de formação do sistema solar também nos fornece uma explicação para a existência de dois grupos de planetas. Os planetas formaram-se a partir da aglutinação de corpos menores. Nessa época, as temperaturas nas regiões próximas ao Sol, onde se formaram os planetas interiores, eram altas o suficiente para que os elementos mais leves não pudessem estar na forma sólida, e assim não poderiam se aglutinar para formar corpos cada vez maiores. Isto é, apenas materiais pesados poderiam permanecer sólidos e formar os planetesimais. Já para distâncias maiores, mesmo os elementos leves poderiam estar sob forma sólida e, por serem mais abundantes, os planetas gigantes são formados basicamente por esses elementos.

É interessante notar que muito do que sabemos sobre a formação do sistema solar é corroborado pelo que observamos no Universo. Existem regiões onde ocorre

atualmente a formação de estrelas, exatamente como aconteceu em nosso sistema solar. Faça uma analogia com os seres humanos. Em uma festa, um dos convivas é um jovem de 20 anos. Porém entre todos os convidados você pode encontrar bebês, crianças, adolescentes, adultos e idosos, todos ao mesmo tempo. Isto é, você pode encontrar pessoas mais jovens e mais velhas que aquele jovem de 20 anos.



FIGURA 3.18 - UM DISCO PLANETÁRIO OBSERVADO NA REGIÃO DE ÓRION PELO HUBBLE SPACE TELESCOPE (STSCI).

3.6 EXISTEM OUTROS SISTEMAS PLANETÁRIOS NO UNIVERSO?

Existe vida fora do planeta Terra? Dentro do sistema solar existe a possibilidade de sondas colherem material de outros planetas ou satélites, que pode ser analisado com a intenção de descobrir indícios de vida. Por outro lado, os meteoritos podem trazer material extraterrestre que em muitos casos é conservado sem alteração e também se constitui em amostras para a investigação de traços de vida.

Mas, como podemos investigar a existência de vida fora do sistema solar? A resposta passa necessariamente pela detecção de outros sistemas planetários. Os tamanhos dos planetas são tipicamente muito menores que os das estrelas e mais do que isso, eles são muito menos luminosos. Por serem pouco brilhantes, pequenos e próximos da estrela, a sua detecção direta é longe de ser trivial. Existe, porém, algumas maneiras indiretas. Já vimos que, em um sistema binário, os corpos giram em torno do centro de massa do sistema. Assim, caso exista um planeta de massa considerável, poderíamos observar um pequeno movimento de translação da estrela. Esse movimento pode ser detectado através da análise das linhas espectrais de uma estrela ou da variação do intervalo entre pulsos de emissão, no caso de pulsares. Essa técnica já permitiu a detecção de alguns planetas fora do sistema solar. A geometria da nuvem de poeira em volta de algumas estrelas jovens, também sugere, de modo ainda mais indireto, a possível existência de planetas. ■

■ Consultem a seção de divulgação da página das Divisão de Astrofísica (<http://www.das.inpe.br>) para links, notícias, e outras informações.

3.7 BIBLIOGRAFIA

Guizzo, J. **O Universo**. 4.ed. São Paulo: Ática, 1996. (Série Atlas Visuais)

Beatty, J. K.; O’Leary, B.; Chaikin, A. **The new solar system**. Cambridge Univ. Press, 1991.

Encrenaz, T.; Bibring, J.-P.; Blanc, M. **The solar system**. New York: Springer-Verlag, 1991.

Jatenco-Pereira, V e outros. **Astronomia: Uma visão geral do Universo**. São Paulo: EDUSP, 2000.

Maciel, W. J. ed. **Astronomia e Astrofísica**: texto do curso de extensão universitária do Departamento de Astronomia do Instituto Astronômico e Geofísico, USP. São Paulo, 1991.

Nussenzveig, H. M. **Curso de Física básica: 1 – Mecânica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1981.

Oliveira Filho, K. S; Saraiva, M. F. O. **Fundamentos de astronomia e astrofísica**. Porto Alegre: Depto. de Astronomia do Instituto de Física –UFRGS, 1999.