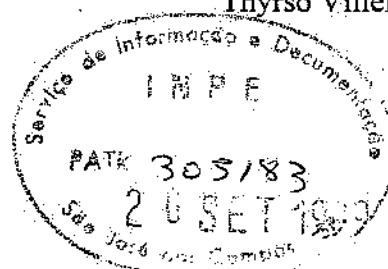


MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-7177-PUD/38

INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA E ASTROFÍSICA

André de Castro Milone
Carlos Alexandre Wuensche
Cláudia Vilega Rodrigues
Francisco José Jablonski
Hugo Vicente Capelato
José Roberto Cecatto
Thyrso Villela Neto



INPE
São José dos Campos
1999

Arquivo: Livro Michael
Em: 27/08/95

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Divisão de Astrofísica
Av. dos Astronautas, 1758
12227-010 – São José dos Campos, SP
Tel.: (012) 345-6804

Colaboração na redação: Ana Maria Zodi

Digitação e formatação: Bianca Costa Marques

Fotocópias e montagem: Gráfica do INPE

AGRADECIMENTOS:

A Ivone Martins, pelo apoio.

A Gabriel Rodrigues Hickel e Flávio D'Amico, pelas sugestões feitas em vários capítulos.

APRESENTAÇÃO

A fascinação pelos mistérios do Universo faz parte da natureza humana desde o começo da civilização. Ao mesmo tempo em que admiramos a sua extensão e beleza, sentimos o desafio de conhecê-lo e o desejo de descobrir a sua conexão conosco. Ao investigarmos o Cosmo estamos também indagando sobre a nossa própria origem.

É bem possível que o homem tenha perscrutado o céu antes da terra, mares e rios, que estavam bem mais próximos.

O ciclo das estações, a luz e o calor do Sol durante o dia, o luar e as estrelas à noite, a necessidade de se orientar em seus percursos de um lugar a outro e de estabelecer uma cronologia para os acontecimentos foram motivos suficientes para o homem tentar equacionar o Universo.

A princípio o Universo conhecido se restringia ao Sol, à Lua e alguns planetas. Com o aperfeiçoamento dos instrumentos astronômicos, e a própria evolução das idéias, o conhecimento humano foi se expandindo e o Cosmo se revelando, de forma surpreendente e impressionante.

O sistema solar é hoje esmiuçado pelas sondas espaciais. Os modernos telescópios parecem nos conferir visão de super-homens. Do Sol, partimos para as demais estrelas que, aos bilhões, permeiam a nossa galáxia, a Via Láctea. Mesmo sem conseguir penetrá-las, a astronomia vem decifrando o seu interior, a sua formação e evolução, tão ligadas à nossa própria existência, pois somos fruto das estrelas.

As gigantescas nuvens interestelares descortinam-se com suas formas curiosas e gases fluorescentes, e revelam-se como berçários de estrelas. Indo mais adiante, notamos que o Universo se organiza em grupos de estrelas, galáxias, e em superaglomerados, intercalados por imensos vazios.

Até onde os instrumentos podem satisfazer a nossa curiosidade, avançamos no espaço e retrocedemos no tempo, em direção aos limites do Universo, que nos mostram a sua

infância e adolescência.

O conhecimento adquirido alimenta as respostas a algumas das indagações básicas do espírito humano: Como surgiu e se desenvolve este imenso teatro, no qual a matéria e a energia produzem espetáculos fantásticos, em contínua renovação?

Estamos em São José dos Campos, uma cidade do planeta Terra, onde os astrônomos do INPE, iguais a muitos em outros lugares, estão indagando sobre os segredos do Universo. Fazem isso pela satisfação que o conhecimento produz. Mas, mais profundamente, para ampliar os horizontes de nosso próprio mundo.

Este caderno reúne os tópicos abordados no Curso de Introdução à Astronomia e Astrofísica do INPE, iniciado em 1998 e programado para ocorrer anualmente ao final do primeiro semestre. É destinado principalmente à atualização de professores do ensino fundamental e médio, e a estudantes universitários vinculados a áreas relacionadas à astronomia.

O curso pretende traçar as linhas básicas do que a astronomia já conseguiu decifrar, delineando também um quadro da evolução das idéias e das técnicas utilizadas na pesquisa científica. Paralelamente, são mostrados os trabalhos que a Divisão de Astrofísica do INPE vem desenvolvendo.

Há ainda o propósito de apresentar uma visão desmitificada da ciência e do cientista, expondo as suas tentativas e incertezas no caminho do conhecimento. Finalizando, a última parte do curso enfoca a importância da ciência básica, como principal geradora de novas idéias e tecnologias.

Alguns dos subprodutos esperados são o de despertar uma possível vocação científica nos estudantes e motivar os educadores a introduzir novas formas de comunicar a ciência a seus alunos.

Para que os objetivos propostos sejam cumpridos satisfatoriamente, este trabalho deve ser constantemente revisado e, nesse sentido, todas as críticas e sugestões serão bem-vindas.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
CAPÍTULO 1	
A ASTRONOMIA NO DIA-A-DIA (<i>André de Castro Milone</i>)	1-1
CAPÍTULO 2	
ASTROFÍSICA OBSERVACIONAL (<i>Francisco Jablonski</i>)	2-1
CAPÍTULO 3	
O SISTEMA SOLAR (<i>Cláudia Vilega Rodrigues e José Roberto Cecatto</i>)	3-1
CAPÍTULO 4	
ESTRELAS (<i>Hugo Vicente Capelato</i>)	4-1
CAPÍTULO 5	
COSMOLOGIA (<i>Carlos Alexandre Wuensche</i>)	5-1
CAPÍTULO 6	
PESQUISAS EM ASTROFÍSICA NO INPE (<i>Thyrso Villela Neto</i>)	6-1

Capítulo 1

A ASTRONOMIA NO DIA-A-DIA

André de Castro Milone*

* e-mail: milone@das.inpe.br

A ASTRONOMIA NO DIA-A-DIA

LISTA DE FIGURAS	1-5
LISTA DE TABELAS	1-7
1.1 INTRODUÇÃO	1-9
1.2 NASCIMENTO DA ASTRONOMIA	1-9
1.2.1 PRÉ-HISTÓRIA	1-9
1.2.2 MUNDO ANTIGO.....	1-10
1.3 PERCEPÇÃO E CONTAGEM DO TEMPO.....	1-11
1.3.1 ANO SOLAR E LUNAÇÃO	1-13
1.3.2 HISTÓRIA DOS CALENDÁRIOS OCIDENTAIS.....	1-13
1.3.3 CALENDÁRIO VIGENTE.....	1-14
1.4 DIAS E NOITES.....	1-16
1.4.1 DIA SOLAR E DIA SIDERAL	1-16
1.4.2 ESFERICIDADE E MOBILIDADE DA TERRA.....	1-18
1.4.3 ESFERA CELESTE E ROTAÇÃO DA TERRA.....	1-20
1.4.4 HORA SOLAR E FUSOS HORÁRIOS	1-23
1.4.5 ASPECTOS DO CÉU EM DIFERENTES LATITUDES.....	1-24

1.5	ESTAÇÕES DO ANO	1-28
1.5.1	MOVIMENTO ANUAL DO SOL E ECLÍPTICA.....	1-28
1.5.2	SOLSTÍCIOS E EQUINÓCIOS.....	1-29
1.5.3	INCLINAÇÃO DO EIXO DE ROTAÇÃO DA TERRA	1-32
1.5.4	GEOCENTRISMO, HELIOCENTRISMO E TRANSLAÇÃO	1-33
1.5.5	ASPECTOS DO CÉU EM DIFERENTES ESTAÇÕES	1-35
1.6	FASES DA LUA	1-41
1.6.1	ASTROS LUMINOSOS E ILUMINADOS.....	1-42
1.6.2	TRANSLAÇÃO DA LUA	1-42
1.6.3	ROTAÇÃO DA LUA E SUA FACE OCULTA.....	1-44
1.6.4	ASPECTOS DAS FASES LUNARES.....	1-44
1.7	ECLIPSES DA LUA E DO SOL.....	1-46
1.7.1	DISTÂNCIAS E DIMENSÕES DO SISTEMA SOL-TERRA-LUA.....	1-46
1.7.2	TIPOS DE ECLIPSES.....	1-49
1.7.3	DURAÇÃO E PERIODICIDADE DOS ECLIPSES.....	1-50
1.8	MARÉS DOS OCEANOS	1-51
1.8.1	INTERAÇÕES SOL-TERRA-LUA	1-52
1.8.2	PERIODICIDADE DAS CHEIAS E VAZANTES.....	1-52
1.9	BIBLIOGRAFIA.....	1-55

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - MEDIÇÃO DO RAIO TERRESTRE POR ERATÓSTENES (240 A.C.), O PONTO A DESIGNA ALEXANDRIA, S, SIENA ONDE UM POÇO É ESQUEMATIZADO E C, O CENTRO DA TERRA. O RAIO POLAR DA TERRA É DESIGNADO POR R.	1-19
FIGURA 1.2 - A ESFERA CELESTE: UMA VISÃO GEOCÊNTRICA DO UNIVERSO.	1-21
FIGURA 1.3 - FUSOS HORÁRIOS DA TERRA.	1-24
FIGURA 1.4 - VISÃO TOPOCÊNTRICA DA ESFERA CELESTE A PARTIR DO EQUADOR.	1-25
FIGURA 1.5 - VISÃO TOPOCÊNTRICA DA ESFERA CELESTE A PARTIR DO PÓLO SUL.	1-26
FIGURA 1.6 - VISÃO TOPOCÊNTRICA DA ESFERA CELESTE A PARTIR DE UM LOCAL ENTRE O EQUADOR E O PÓLO SUL.	1-27
FIGURA 1.7 - OS INÍCIOS DAS ESTAÇÕES DO ANO ATRAVÉS DAS PERSPECTIVAS HELIOCÊNTRICA E GEOCÊNTRICA (A ILUSTRAÇÃO ESTÁ FORA DE ESCALA).....	1-30
FIGURA 1.8 - VISÃO TOPOCÊNTRICA PARA O NASCER DO SOL NOS SOLSTÍCIOS E EQUINÓCIOS PARA UM LUGAR TROPICAL DO HEMISFÉRIO SUL DA TERRA.	1-31
FIGURA 1.9 - A TRANSLAÇÃO DA TERRA (VISTA DO NORTE DA ECLÍPTICA), COM OS INÍCIOS DAS ESTAÇÕES DO HEMISFÉRIO SUL ASSINALADOS (ILUSTRAÇÃO FORA DE ESCALA).....	1-35
FIGURA 1.10 - MOVIMENTO APARENTE ANUAL DO SOL POR ENTRE AS CONSTELAÇÕES ZODIACIAS DEVIDO À TRANSLAÇÃO DA TERRA (ILUSTRAÇÃO FORA DE ESCALA).....	1-36
FIGURA 1.11 - PROJEÇÃO DO CÉU PARA SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, ÀS 21H, PARA O MEIO DO VERÃO.	1-39

FIGURA 1.12 - PROJEÇÃO DO CÉU PARA SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, ÀS 21H, PARA O MEIO DO OUTONO.	1-39
FIGURA 1.13 - PROJEÇÃO DO CÉU PARA SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, ÀS 21H, PARA O MEIO DO INVERNO.....	1-40
FIGURA 1.14 - PROJEÇÃO DO CÉU PARA SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, ÀS 21H, PARA O MEIO DA PRIMAVERA.	1-40
FIGURA 1.15 - A LUA EM FASES DISTINTAS (FOTOS DE ANDRÉ MILONE, NO OBSERVATÓRIO DO VALONGO/UFRJ, RIO DE JANEIRO, 1988).	1-41
FIGURA 1.16 - A TRANSLAÇÃO DA LUA: SUAS FASES PRINCIPAIS COMO SÃO VISTAS DO HEMISFÉRIO SUL DA TERRA (ILUSTRAÇÃO FORA DE ESCALA).....	1-43
FIGURA 1.17 - A FACE OCULTA DA LUA VISUALIZADA EM DUAS IMAGENS. REPRE QUE A LUA ESTÁ NA SUA FASE NOVA!	1-46
FIGURA 1.18 - CÁLCULO DA DISTÂNCIA TERRA-SOL FEITO POR ARISTARCO (300 A.C.).....	1-47
FIGURA 1.19 - ILUSTRAÇÃO EM ESCALA DE UM ECLIPSE TOTAL DA LUA.	1-48
FIGURA 1.20 - ILUSTRAÇÃO DE UM ECLIPSE TOTAL DO SOL (FORA DE ESCALA) COM FOTOGRAFIA FEITA A PARTIR DO PONTO B DONDE É AVISTADO COMO PARCIAL (FOTO DE ANDRÉ MILONE, NO OBSERVATÓRIO DO VALONGO/UFRJ, RIO DE JANEIRO, 1987).	1-50
FIGURA 1.21 - ILUSTRAÇÃO DO EFEITO DE MARÉ TOTAL SOBRE OS OCEANOS DA TERRA NA OCASIÃO DA LUA CHEIA (VISÃO DO NORTE DA ECLÍPTICA, FORA DE ESCALA).	1-53

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 - CONSTELAÇÕES VISÍVEIS POR ESTAÇÃO DO ANO PARA O HEMISFÉRIO SUL.

..... 1-38

TABELA 1.2 – ALGUNS DADOS FÍSICOS DO SOL, TERRA E LUA. 1-47

1.1 INTRODUÇÃO

É marcante o fascínio que as pessoas sentem pelo céu. Quem nunca admirou um pôr do Sol ou ficou impressionado com uma tempestade? Todavia, ainda hoje, os fenômenos celestes e atmosféricos que fazem parte de nosso cotidiano não são compreendidos por grande parte da humanidade. Inclusive, ainda ocorre a mitificação desses fenômenos naturais.

Este capítulo pretende, dentro de certas limitações, apresentar aos educadores e estudantes universitários uma introdução aos fenômenos celestes presentes no nosso dia-a-dia muito embora passem despercebidos pela maioria. Os fenômenos relacionados exclusivamente à dinâmica da atmosfera de nosso planeta não serão abordados. A influência da atmosfera terrestre na observação científica dos astros é enfocada no Capítulo 2.

1.2 NASCIMENTO DA ASTRONOMIA

Na época atual, é cada vez mais difícil admirar um céu noturno escuro e estrelado, principalmente para quem vive num centro urbano. A poluição luminosa da cidade ofusca o brilho da maioria dos astros. Além do mais, quem consegue reservar um intervalo de tempo para essa tarefa tendo que cumprir tantos compromissos profissionais, familiares e pessoais?

1.2.1 PRÉ-HISTÓRIA

Imagine-se agora em um passado muito remoto, mais precisamente na pré-história (de 100 mil anos atrás até cerca de 8 mil a.C.), quando o ser humano vivia em pequenos grupos nômades. A preocupação com a sobrevivência num ambiente natural e hostil era crucial. Caçar, pescar, procurar frutas e raízes, fugir de animais perigosos e abrigar-se das variações climáticas faziam parte do cotidiano do homem pré-histórico. O homem dessa época tinha que se adaptar à alternância do claro-escuro e à mudança das estações. Certamente, o Sol foi o primeiro astro a ser notado. As razões são óbvias: é o Sol que

proporciona a mais evidente alternância de claro-escuro da natureza (o dia e a noite) e que atua como a principal fonte de calor para nós. A Lua foi o segundo astro a ser percebido, visto que ilumina a escuridão da noite, principalmente em sua fase cheia. As estrelas devem ter sido notadas em seguida, como pontos brilhantes em contraste a um céu bastante escuro. Os outros cinco astros errantes (significado original da palavra planeta, de origem grega) visíveis a olho nu só foram notados, quando a observação do céu se tornou persistente noite após noite. Esse tipo de investigação da natureza já necessitava de um pouco mais de inteligência por parte de nossos ancestrais. Há desenhos rupestres (inscritos em rochas) que incluem figuras de astros. Tanto os astros, como os animais, as montanhas, as florestas, os desertos e a água eram tidos como divindades porque não eram inteiramente compreendidos.

1.2.2 MUNDO ANTIGO

Após a última glaciação, a agricultura e a domesticação de animais tornaram-se atividades importantes para a sobrevivência do homem em nosso planeta. Começaram a aparecer os primeiros vilarejos e povoados. As primeiras civilizações mais notáveis surgiram a partir de 5.500 anos atrás, em quatro regiões hidrográficas distintas do planeta: nas bacias dos rios Tigre e Eufrates (Mesopotâmia, região atual do Irã e Iraque), por volta do ano 3500 a.C., com os sumerianos; ao longo do rio Nilo (atual Egito) em torno de 3100 a.C.; nas margens do rio Indus (atual Índia) por volta de 2500 a.C.; e em torno do rio Amarelo (atual China) em cerca do ano 2000 a.C. As sociedades da Mesopotâmia, Índia e do Antigo Egito influenciaram umas às outras devido à proximidade entre elas, inclusive marcando o desenvolvimento de outras posteriores como a da Antiga Grécia.

O desenvolvimento da escrita e, posteriormente, o da matemática, foram essenciais para o crescimento cultural e científico das primeiras civilizações, inclusive no campo da Astronomia. Certamente, a Astronomia é uma das ciências mais antigas da Humanidade. Nas civilizações antigas, o homem ainda continuava a associar divindades aos fenômenos naturais (astronômicos ou não). Os homens pré-histórico e antigo buscavam encontrar explicações mitológicas para vários fenômenos celestes observados, entre os quais: os dias, as noites, os eclipses da Lua e do Sol, as fases da Lua, o caminhar dos planetas por entre as estrelas, os cometas e as estrelas cadentes.

Além do mais, nossos antepassados buscavam associar os fenômenos celestes aos terrestres e vice-versa.

Das quatro civilizações citadas, a mais antiga é sem dúvida, aquela que surgiu na Mesopotâmia, reunindo várias cidades bem estruturadas nas bacias férteis dos rios Tigre e Eufrates. Uma das cidades-estado foi a Babilônia, cuja supremacia durou uns 300 anos. Os babilônios foram um dos primeiros povos a registrar a presença dos cinco planetas visíveis a olho nu (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno), certamente sob a influência cultural dos sumerianos. Os deuses, os heróis e os animais desse povo eram associados aos astros observados. Na mitologia babilônica, a água líquida era a Mãe da natureza e sustentadora da Terra. O céu era representado por uma cúpula azul feita de rocha onde as estrelas estavam incrustadas, sendo a mesma sustentada pelas altas montanhas terrestres. Os babilônios buscavam entender as vontades dos deuses observando os astros no céu, as quais se refletiam de algum modo nos fatos terrestres. Assim, a Astrologia e a Astronomia nascem juntas, como uma única forma de conhecimento. A palavra desastre significa, primordialmente, um fato que contraria os astros. Conceberam as primeiras constelações, que eram apenas representações de figuras de deuses, animais e objetos “desenhadas” pelas estrelas. As constelações do Zodíaco são um exemplo.

1.3 PERCEPÇÃO E CONTAGEM DO TEMPO

O homem começou a perceber o caminhar do tempo, que acontece em uma única direção e flui sem interrupção (conceitos de unidirecionalidade e continuidade do tempo clássico), por meio da observação de fenômenos naturais. São exemplos: o germinar e crescimento de uma planta, o desabrochar de uma flor, o crescimento de um animal doméstico, o envelhecimento de uma pessoa, o caminhar do Sol no céu ao longo de um dia, a mudança do aspecto da Lua ao longo de um mês, a mudança cíclica das estações do ano e, até mesmo, a alteração do aspecto do céu noturno ao longo de um ano.

As primeiras organizações sociais humanas precisavam medir a passagem do tempo em inúmeras atividades práticas, tais como: saber a época certa para plantar uma determinada cultura, antecipar as estações de cheia e vazante de um rio e conhecer as

datas das celebrações religiosas. Por incrível que pareça, a primeira marcação de tempo ocorreu para períodos longos (meses e anos) e não para intervalos curtos (dias e horas).

Os povos antigos necessitavam também conhecer o espaço geográfico local, com a finalidade de se deslocarem quando necessário (sempre com um rumo definido). Além do mais, quando a pesca, a caça e o comércio envolviam grandes distâncias, a necessidade de conhecer o caminho de ida-e-volta era óbvia.

O QUE SÃO CONSTELAÇÕES?

Uma constelação corresponde a uma mera configuração projetada no céu, formada por linhas imaginárias conectando estrelas brilhantes. É associada a um desenho que representa um objeto, herói ou deus da sociedade humana que a concebeu. O termo constelação vem do vocábulo latino *constellatio*, que significa reunião de astros, muito embora as estrelas de uma constelação não estejam fisicamente reunidas pela gravitação em função das enormes distâncias que as separam. As 48 constelações clássicas foram compiladas pelo grego Ptolomeu em 137 d.C., inclusive as zodiacais. Parte das constelações clássicas simboliza histórias e mitologias herdadas dos povos antigos da Mesopotâmia e Egito. Em 1929, a União Astronômica Internacional estabeleceu uma cartografia completa da esfera celeste contendo 88 constelações no total. As 40 outras, acrescentadas na era moderna, foram definidas principalmente na época das grandes navegações oceânicas. Elas simbolizam essencialmente animais pertencentes às novas terras “descobertas” pelos europeus, e objetos usados na navegação da época. A maioria das constelações “recentes” situa-se no hemisfério sul do céu.

O QUE É NAVEGAÇÃO CELESTE?

Um dos tipos mais antigos de orientação no espaço e no tempo, utilizados pelo homem para se movimentar pela superfície terrestre, é a navegação por meio da posição das estrelas no céu. A navegação celeste é mais comumente aplicada para navegações marítimas. A partir da observação da posição de determinadas estrelas com relação ao meridiano celeste local e ao horizonte, pode-se calcular a posição geográfica correta de um lugar.

1.3.1 ANO SOLAR E LUNAÇÃO

A observação sistemática do caminhar do Sol no céu permitiu ao homem perceber dois fatos notáveis: (i) tanto o nascer do Sol como o pôr do Sol não ocorrem diariamente nos mesmos pontos do círculo do horizonte, (ii) a duração desse caminhar é diferente dia após dia. O mais incrível foi notar que esses fatos ocorrem de forma cíclica, cujo período é denominado de ano solar ou trópico. O ano solar tem 365,2422 dias (365 dias, 5 horas, 48 minutos e 46,08 segundos).

A observação persistente da mudança do aspecto da Lua fez notar que o intervalo de tempo entre duas fases iguais e consecutivas corresponde a 29,53059 dias. Esse período lunar é denominado de lunação (ou período sinódico da Lua). O conceito de mês surgiu desse fato astronômico. Muitas sociedades antigas utilizaram e algumas ainda adotam o ano lunar, que possui 12 meses lunares, ou seja, 354,36708 dias (354 dias, 8 h, 48 min e 35,71 s). Os povos árabes do oriente médio usam um calendário baseado no mês lunar. Já os judeus utilizam um calendário lunissolar. O mundo ocidental contemporâneo usa um calendário solar que sofreu influência do calendário lunar, isto é, adotamos um ano com 12 meses, originários das 12 lunações.

1.3.2 HISTÓRIA DOS CALENDÁRIOS OCIDENTAIS

Os primeiros calendários da Roma Antiga (750 a.C. - 476 d.C.) eram caracterizados a bel prazer pelos próprios imperadores vigentes, baseados inclusive em superstições. O calendário do imperador Rômulo (753-717 a.C.) apresentava 304 dias com 10 meses de duração variável e o calendário de Numa Pompílio (717-673 a.C.) possuía 355 dias divididos basicamente em 12 ou 13 meses (de 29 ou 31 dias). O calendário de Pompílio aplicava uma correção ao ano solar de modo mais satisfatório do que o de Rômulo, porém era ainda muito complicado. Os nomes dos meses adotados por nós são originários desses calendários romanos. O imperador Júlio César (100-44 a.C.) decidiu adotar um calendário solar com 365 dias dispostos em 12 meses, de modo que a cada quatro anos o ano teria 366 dias. O primeiro mês do calendário juliano passou a ser *Januarius* e o dia excedente era acrescentado ao mês *Februarius* dando origem ao nosso ano bissexto. Por curiosidade, o nome do sétimo mês do nosso calendário, Julho, vem de uma homenagem a esse imperador romano após sua morte. A palavra calendário

provém da nomenclatura latina usada pelos antigos romanos para a designação da primeira parte de um mês: *kalendae*. As outras duas partes de um mês eram denominadas de *nonas* e *idus*.

Apesar de todos os ajustes efetuados na Roma Antiga, o ano juliano tinha em média 365,25 dias (ou 365 dias e 6 horas), sendo ligeiramente diferente do ano solar. A correção referente aos anos bissextos a cada quatro anos não foi suficiente. Ao longo de muitos anos, a diferença tornava-se cada vez maior, acrescentando um dia extra a cada intervalo de 128 anos, aproximadamente. Somente em 1582, o papa Gregório XIII (1512-1586) estabeleceu uma reforma crucial ao calendário ocidental. Assim foi a reforma gregoriana: (i) suprimiu 10 dias acumulados, para que o início de cada estação ocorresse na época certa; (ii) eliminou a ocorrência de anos bissextos durante três anos seculares para cada período de 400 anos, de modo que o ano 1600 foi bissexto, os anos 1700, 1800 e 1900 não o foram, o ano 2000 o será, e assim sucessivamente (somente os anos seculares divisíveis por 400 são bissextos); (iii) a contagem dos dias do mês passou a ser caracterizada por números cardinais (1, 2, 3, ..., 31) e não mais pela ordenação de *kalendae*, *nonas* e *idus*.

No entanto, ainda assim, resta uma diferença residual entre o ano solar e o ano gregoriano, que causa o acréscimo de um dia para cada período de 3333,3333... anos. Desta maneira, o ano 4000 não deverá ser bissexto.

Alguém poderia propor mais uma reforma ao nosso calendário, fazendo um ano composto por 13 meses de 28 dias, porém isto é bem improvável.

1.3.3 CALENDÁRIO VIGENTE

Um modo de entender o calendário ocidental atual (gregoriano modificado) é expressar a duração do ano solar por uma soma de dias inteiros e fracionários.

$$365,2422 \text{ dias} \cong 365 + 1/4 - 1/100 + 1/400 - 1/3300 \text{ dias}$$

O termo à esquerda da quase-igualdade representa a duração do ano solar. O lado direito é composto por cinco termos:

(a) o primeiro é a duração do ano padrão;

(b) a adição da fração $1/4$ corresponde à soma de um dia a cada quatro anos (os anos bissextos, que ocorrem em anos divisíveis por 4);

(c) a subtração de $1/100$ mostra a necessidade de não incluir um dia a cada 100 anos;

(d) a adição de $1/400$ indica a necessidade da ocorrência de um ano bissexto a cada 400 anos;

(e) a última fração à direita diz que se deve suprimir a inclusão de um dia a cada 3300 anos, aproximadamente.

De acordo com os itens (c) e (d), o ano 2000 será bissexto, mas os anos 2100, 2200 e 2300 não o serão.

ORIGEM DA SEMANA

O vocábulo semana provém do latim *septimana*, que significa sete manhãs (usado na Roma Antiga). O conceito de semana de 7 dias originou-se da duração de cada período lunar marcante ou do culto diário aos sete astros errantes pelos babilônios. O domingo era dedicado ao Sol, segunda-feira à Lua, terça a Marte, quarta a Mercúrio, quinta a Júpiter, sexta a Vênus e sábado a Saturno. As nomeações dos dias da semana em várias línguas modernas (ex. espanhol, francês, inglês e alemão) originaram-se dos nomes em latim desses astros (*Solis*, *Lunae*, *Martis*, *Mercurie*, *Jovis*, *Veneris* e *Saturni* respectivamente). A língua portuguesa não seguiu essa denominação para os dias da semana porque sofreu influência do cristianismo. As comemorações da Páscoa Cristã originalmente duravam uma semana de orações. Os dias da Páscoa eram denominados *feriae* em latim, significando feriados. O domingo era nomeado por *feria-prima*, a segunda-feira era *feria-segunda* e assim por diante. O sábado vem do vocábulo latino *Shabbath*, que correspondia ao dia de descanso dos hebreus. A denominação domingo usada pelos povos latinos origina-se da substituição de *feria-prima* (ou *dies Solis*) por *dominica* imposta pelo imperador Flávio Constantino (Roma antiga, 280-337 d.C.), a qual significa dia do Senhor, quando da sua conversão ao cristianismo.

DÉCADA, SÉCULO E MILÊNIO

Quando se deu o início da contagem dos anos no calendário ocidental atual e quando ocorre a mudança de década, século e milênio?

O calendário juliano adota a época da fundação de Roma (753 a.C.) para o início da contagem, e o calendário gregoriano, que é essencialmente cristão, considera o nascimento de Jesus Cristo. Contudo, parece que Cristo nasceu no ano 4 a.C. e não no ano 1 d.C. como se pensa. Além do mais, não existiu o ano 0 (zero), de modo que o primeiro período de 10 anos (uma década) começou no ano 1 terminando no ano 10, assim como o primeiro século que terminou no ano 100 e o primeiro milênio, que findou no ano 1000. Consequentemente, o século XXI e o 3º milênio começarão em 2001, e não em 2000, como muita gente pode imaginar.

1.4 DIAS E NOITES

Muitas civilizações antigas elaboraram explicações míticas para o movimento do Sol no céu durante o dia, assim como seu reaparecimento após a escuridão da noite. Como exemplos, os antigos babilônios pensavam no deslocamento noturno do Sol por debaixo do solo que era a morada dos mortos e os antigos egípcios (3200 a.C.) imaginavam o transporte do Sol no céu (corpo da deusa *Nut*) por um barco que durante a noite percorria um rio subterrâneo. Na Grécia clássica (600 a.C.), muitos afirmavam que a Terra era imóvel de modo que o Sol, deus *Helios*, percorria o céu numa grande carruagem.

1.4.1 DIA SOLAR E DIA SIDERAL

No transcorrer de um dia, atualmente dividido em 24 horas, nossos ancestrais faziam poucas divisões: manhã, meio do dia, tarde, início da noite, meio da noite e fim da noite. A observação do deslocamento do Sol era adotada na parte clara do dia. O deslocamento das estrelas mais brilhantes era aplicado para a subdivisão da noite.

A primeira definição de dia veio da observação do Sol, que corresponde ao dia solar. Além do mais, por questões práticas, o homem sentiu a necessidade de criar uma

ordenação matemática para o dia/noite, visto que nós possuímos um relógio biológico interno, completamente adaptado ao ciclo diário do Sol. O dia solar corresponde ao intervalo de tempo entre duas passagens consecutivas do Sol pelo meridiano celeste do lugar, uma linha imaginária no céu que une os pontos cardeais norte e sul passando pelo zênite (ponto imaginário no céu diametralmente oposto ao centro da Terra). O dia solar é dividido por definição em 24 horas solares.

Uma outra referência astronômica para definir o dia é representada pelas estrelas. É o dia sideral. Corresponde ao intervalo de tempo entre duas passagens sucessivas de uma determinada estrela pelo meridiano celeste local. Por convenção, o dia sideral é dividido em 24 horas siderais.

O dia solar e o dia sideral são diferentes pela simples razão de que a Terra não é imóvel e sim translada ao redor do Sol. Qual é o mais curto? Pensemos juntos: enquanto a Terra gira em torno do seu eixo ela continua a caminhar ao redor do Sol no mesmo sentido e para que o Sol volte a assumir a mesma posição no céu depois de uma rotação completa da Terra, serão gastos alguns minutos a mais. Portanto, o dia solar é mais longo do que o sideral, mas apenas em cerca de 3 min e 56 s.

1 dia solar = 24 horas (solares)

1 dia sideral $\cong$ 23 horas, 56 minutos e 4 segundos (solares)

Outra pergunta: Qual é, então, o tempo gasto pela Terra para dar um giro completo em torno de si mesma? O referencial mais adequado para se medir a rotação da Terra é dado pelas estrelas distantes e não pelo Sol. Devido às próprias distâncias das estrelas, que estão muito mais longe do que o Sol, suas posições no céu são praticamente constantes. Portanto, emprega-se o período sideral.

A noite é a parte do dia, de 24 h, quando o Sol está abaixo do plano do horizonte. Há várias definições de noite. A noite civil começa (e termina) quando o centro do disco solar situa-se a 6 graus abaixo do horizonte e a noite astronômica, quando o Sol está a 18 graus. Os dias civil e astronômico são os complementos respectivos dessas definições de noite. Durante a noite astronômica, o céu não sofre alteração em brilho.

enquanto que no início e fim da noite civil há ainda claridade crepuscular. Entretanto, por todo este capítulo, definimos “dia claro” como sendo a parte do dia em que o Sol está acima do horizonte e noite como seu complemento.

MEIO-DIA SOLAR E GNÔMON ASTRONÔMICO

Quando o Sol cruza o meridiano celeste local, estamos na metade tanto do “dia claro” como do dia civil e do dia astronômico, o meio-dia solar. Diz-se que o Sol culminou, de modo que ele atinge sua altura máxima no céu, projetando a menor sombra de qualquer objeto. Se esse objeto for uma haste perpendicular a uma superfície horizontal plana (um gnômon astronômico), sua sombra mínima diária fica sempre alinhada paralelamente à direção norte-sul. O gnômon é o mais antigo instrumento de observação astronômica.

TEMPO ASTRONÔMICO E TEMPO ATÔMICO INTERNACIONAL

Até meados da década de 50, a unidade básica de tempo, o segundo, era definida pela Astronomia. Um segundo de tempo correspondia a cada uma das 86.400 partes do dia solar médio (1 segundo $\equiv$ 1/86.400 de 24 horas solares médias). A partir de então, o segundo passou a ser definido como sendo o intervalo de tempo gasto por 9.192.631.770 ciclos de uma transição eletrônica hiperfina do átomo de Césio 133. Essa é a definição do segundo internacional, ou melhor, tempo atômico. Contudo, o padrão de tempo usado por nós é o tempo universal coordenado, que corresponde ao tempo atômico corrigido na origem, toda vez que a diferença com relação ao tempo astronômico ultrapassa um certo valor.

1.4.2 ESFERICIDADE E MOBILIDADE DA TERRA

A idéia de imobilidade da Terra perdurou por muito tempo, até por volta do Renascimento Europeu, com a primeira revolução científica liderada por Nicolau Copérnico (1473-1543), Galileu Galilei (1564-1642) e Isaac Newton (1642-1727). O conceito de esfericidade para o nosso planeta não era totalmente aceito nessa época, embora Aristóteles (600 a.C.) já o tivesse proposto, ao observar eclipses da Lua (a

sombra da Terra era sempre circular quando projetada na Lua), e Eratóstenes (240 a.C.) já tivesse calculado o raio terrestre. Com as grandes viagens de circunavegação, todos tiveram que aceitar tais idéias.

Eratóstenes notou que o Sol não ficava a uma mesma altura no céu, simultaneamente em duas cidades do Egito Antigo (Alexandria e Siena, atual Assuan), situadas aproximadamente no mesmo meridiano terrestre. Ele observou que ao meio-dia de um solstício de verão, enquanto o Sol iluminava o fundo de um poço artesiano em Siena, um gnômon projetava uma pequena sombra em Alexandria, como é mostrado na Figura 1.1. Bastaria, então, conhecer a distância entre as duas cidades e o ângulo de separação entre elas em relação ao centro da Terra. Este ângulo corresponde àquele formado pelo gnômon e o raio de luz vindo do Sol, cujo vértice é a própria extremidade superior do gnômon. Admitindo-se uma distância de 5.000 *stadia* (unidade de comprimento da época; 1 *stadia* $\cong$ 185 m), a estimativa de Eratóstenes para o diâmetro polar da Terra foi de 14.715 km, muito próximo do valor moderno de 12.718 km.

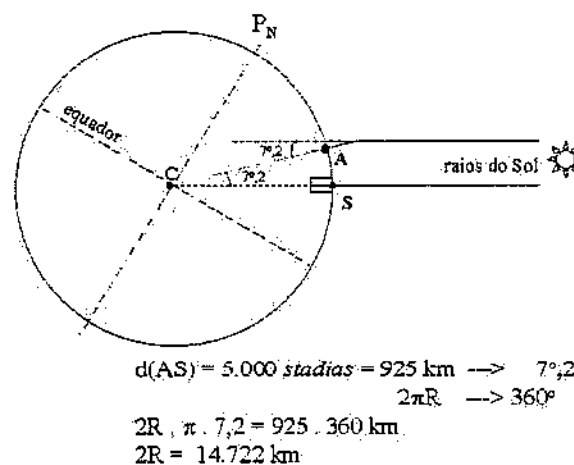


FIGURA 1.1 - MEDIÇÃO DO RAIOS TERRESTRE POR ERATÓSTENES (240 A.C.). O PONTO A DESIGNA ALEXANDRIA, S, SIENA ONDE UM POÇO É ESQUEMATIZADO E C, O CENTRO DA TERRA. O RAIOS POLAR DA TERRA É DESIGNADO POR R.

É fácil compreender a idéia de imobilidade da Terra, seja ela esférica ou não. Do ponto de vista de uma pessoa sobre qualquer ponto da superfície terrestre exceto os pólos, observa-se que tanto o Sol como a maioria dos outros astros surgem no horizonte leste, elevam-se no céu e vão se esconder na parte oeste. Parece, então, que todo o céu está girando em torno de nós. Além do mais, quando jogamos qualquer objeto verticalmente para cima, ele sempre cai em queda livre no mesmo lugar de onde saiu (se não estiver ventando no momento); dando a impressão de que a Terra como um todo não se move como era concebido pela Física Aristotélica admitida até a revolução científica do Renascimento Europeu. Contudo, segundo a Física Newtoniana, o mesmo pode-se afirmar quando repetimos essa experiência dentro de um veículo em movimento retilíneo e uniforme, que em primeira aproximação pode representar o efeito do movimento de rotação da Terra num dado ponto de sua superfície. Foi notório o debate científico entre as idéias revolucionárias de Galileu e o paradigma científico daquela época, transformado em dogma pela Igreja Cristã. As leis de movimento elaboradas por Newton sustentaram a aceitação das idéias de Galileu: a Terra não está imóvel no centro do Universo, mas sim, gira em torno de si mesma e translada ao redor do Sol (veja o Capítulo 3, para mais detalhes).

A rotação da Terra foi comprovada por medição direta não astronômica, em 1851, através do experimento do pêndulo de Léon Foucault (físico francês). Ele verificou que ao abandonar um pêndulo à ação da gravidade, o plano de oscilação do mesmo gira em torno da vertical do lugar.

1.4.3 ESFERA CELESTE E ROTAÇÃO DA TERRA

Qualquer pessoa ao observar o céu de um local descampado percebe que está no centro de um grande hemisfério celeste. Esse tipo de visualização do céu contribuiu para a concepção do geocentrismo. O céu na Astronomia é idealizado como uma grande esfera, a esfera ou abóbada celeste, que está centrada na Terra (visão geocêntrica: Figura 1.2).

O movimento dos astros no céu, ao longo de um dia ou uma noite, ocorre de leste para oeste. Dizemos que é um movimento aparente, porque não são os astros que se movem, mas sim a Terra que gira de oeste para leste. A Figura 1.2 mostra que a esfera celeste parece girar no sentido contrário ao da rotação da Terra.

A trajetória de um determinado astro durante seu movimento diário aparente ocorre paralelamente ao equador celeste, como visto na Figura 1.2. Esse círculo imaginário, que divide o céu em duas metades, nada mais é que uma projeção do equador terrestre na abóbada celeste.

A rotação da Terra define um eixo cujas interseções com a superfície terrestre são os pólos geográficos norte e sul (pontos imaginários). As linhas imaginárias sobre a superfície da Terra que unem os pólos são denominadas meridianos terrestres. Um plano perpendicular ao eixo de rotação, e equidistante de ambos os pólos, divide o globo em dois hemisférios, norte e sul. A interseção deste plano com a superfície da Terra define o equador terrestre. Os paralelos terrestres são os círculos imaginários paralelos ao equador.

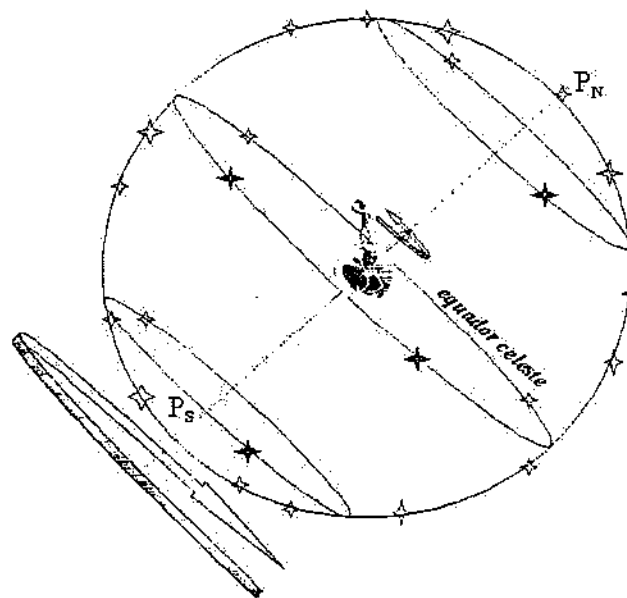


FIGURA 1.2 - A ESFERA CELESTE: UMA VISÃO GEOCÊNTRICA DO UNIVERSO.

Não “sentimos” a rotação da Terra porque a força centrífuga associada a ela é somente 3% da força de gravidade. Se a Terra passasse a girar cada vez mais rápido, chegaríamos ao ponto de ter gravidade zero, ou mesmo de sermos jogados para fora da superfície (de modo análogo a um carrossel). Contudo, a velocidade de rotação não é desprezível. No equador terrestre, a velocidade linear de rotação fica por volta de 1670 km/h. Sobre o Trópico de Capricórnio (latitude aproximada de São José dos Campos), a velocidade de rotação é cerca de 1500 km/h.

Da mesma forma que na Terra, existem na esfera celeste os pólos norte e sul, definidos como sendo as interseções imaginárias do eixo de rotação terrestre com o céu (veja Figura 1.2).

COORDENADAS GEOGRÁFICAS

Para localizar uma cidade na Terra, precisamos de duas coordenadas: latitude e longitude. A latitude de um ponto qualquer sobre a superfície da Terra é o ângulo contado a partir do equador até esse ponto, ao longo do meridiano do lugar. A latitude vai de -90° (no pólo sul), 0° (no equador) até $+90^\circ$ (no pólo norte), por convenção. A longitude é o ângulo medido sobre o equador a partir de um meridiano de referência até o meridiano do lugar. O meridiano de referência do Sistema de Coordenadas Geográficas é aquele que passa pelo Observatório de Greenwich (Inglaterra). A longitude é medida em graus ($^\circ$) ou em horas (h), indo de 0° no meridiano de Greenwich até $+180^\circ$ (ou +12 h), quando contamos no sentido oeste de Greenwich, e até -180° (ou -12 h), quando contamos para leste (é comum nomear como longitude leste ou oeste).

COORDENADAS CELESTES EQUATORIAIS

As coordenadas celestes equatoriais são definidas de maneira análoga às geográficas, sendo aplicadas à localização dos astros no céu. Precisamos, novamente, de duas coordenadas: declinação e ascensão reta. A declinação é contada a partir do equador celeste, usando-se a mesma convenção: de 0° a $+90^\circ$ para o norte e 0° a -90° para o sul. A ascensão reta é contada sobre o equador celeste, desde um ponto de referência até o meridiano do astro no sentido de oeste para leste, indo de 0 a 24 h. Esse ponto de referência é uma das interseções da eclíptica (projeção da órbita da Terra na esfera celeste) com o equador do céu, sendo denominado de Ponto Vernal ou Gama, marcando a passagem do Sol do hemisfério celeste sul para o norte.

REGRA DA MÃO DIREITA E SENTIDO DA ROTAÇÃO TERRESTRE

Com a finalidade de visualizar o movimento de rotação da Terra no espaço, basta aplicarmos a regra da mão direita. Dispõe-se a mão direita com o dedo polegar para cima, o qual representaria o pólo norte. O sentido da rotação terrestre é o mesmo daquele usado para o fechamento da mão (veja a Figura 1.2).

1.4.4 HORA SOLAR E FUSOS HORÁRIOS

O Sol culmina no céu sempre ao meio-dia solar. Porém, isto ocorre em tempos diferentes para cada meridiano terrestre, conforme a Terra vai girando em torno de si mesma. Enquanto em um determinado lugar o Sol está culminando, em outros o Sol já culminou ou ainda vai culminar. Do mesmo modo, enquanto em alguns lugares o Sol está surgindo no horizonte, em outros o Sol está se pondo. Portanto, a hora solar é local e é fornecida diretamente por um relógio solar.

Além disso, o Sol não caminha com a mesma velocidade ao longo de sua trajetória anual aparente (ao redor da Terra). Para corrigir esse efeito, criou-se a hora solar média, a partir do movimento uniforme de um Sol fictício. A diferença entre a hora solar média e a hora solar verdadeira é definida como sendo a Equação do Tempo, e pode resultar em até 15 (quinze) minutos a mais ou a menos. A equação do tempo decorre do fato de que a velocidade da Terra em torno do Sol não é constante (translação numa órbita elíptica).

Um fuso horário corresponde a uma faixa de longitude terrestre com 15° (ou 1 h) de largura, na qual se adota a hora solar média do seu meridiano central como sendo sua única hora: a hora civil ou legal. O meridiano de origem (longitude = 0 h) dos fusos horários é aquele que passa pelo Observatório de Greenwich, adotado por questões históricas. A Figura 1.3 mostra os fusos horários adotados no mundo. O Brasil possui quatro fusos horários: o fuso de -2 horas para Fernando de Noronha e Ilhas Oceânicas, -3 horas para Brasília e a maioria dos estados, -4 horas para os estados de RO, RR, MS, MT, parte oeste do Pará e a parte leste do Amazonas e -5 horas para o Acre e o extremo oeste do Amazonas. O horário de Brasília está em atraso com relação aos europeus, e adiantado em relação aos dos EUA.

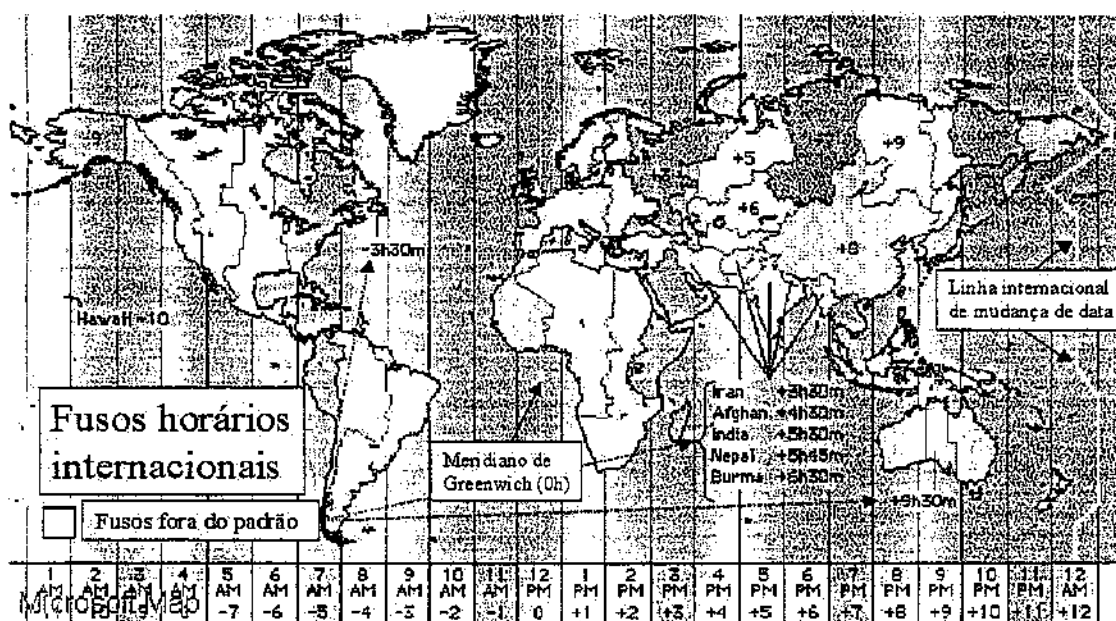


FIGURA 1.3 - FUSOS HORÁRIOS DA TERRA.

O QUE É HORÁRIO DE VERÃO?

O horário de verão é simplesmente a hora civil acrescida de uma ou mais unidades, com a finalidade de se aproveitar a claridade do começo e fim do dia civil, economizando assim energia elétrica. O início e o término do horário de verão estão condicionados à data do solstício de verão (22/12 para o hemisfério sul), quando a duração do “dia claro” é máxima. Na prática, o meio do período do horário de verão deve se situar próximo a essa data.

1.4.5 ASPECTOS DO CÉU EM DIFERENTES LATITUDES

Quando nos deslocamos em latitude na Terra, podemos perceber que o aspecto do céu noturno vai mudando ligeiramente. Certas estrelas e constelações deixam de ser vistas e outras passam a ser avistadas por nós. O Sol também começa a mudar de trajetória diurna, fazendo com que a duração do dia civil aumente ou diminua.

Para uma pessoa que está exatamente sobre o equador da Terra (latitude 0° e longitude qualquer), ambos os hemisférios do céu podem ser observados por completo. Nesse caso singular, o plano do equador celeste está disposto perpendicularmente ao plano do horizonte, e é representado pelo círculo que cruza o zênite e une os pontos cardeais leste e oeste (Figura 1.4). No equador terrestre, as trajetórias diárias dos astros ocorrem em planos perpendiculares ao plano do horizonte, de modo que, diariamente, todos os astros ficam metade do tempo acima do horizonte e metade do tempo abaixo, como pode ser visualizado na Figura 1.4. Consequentemente, os “dias claros” e as noites tem a mesma duração de 12 horas, em média, ao longo de todo o ano. Os dias civis duram, em média, 12 h e 48 min (noites civis de 11 h e 12 min) e os dias astronômicos, 14 h e 24 min (noites astronômicas de 9 h e 36 min).

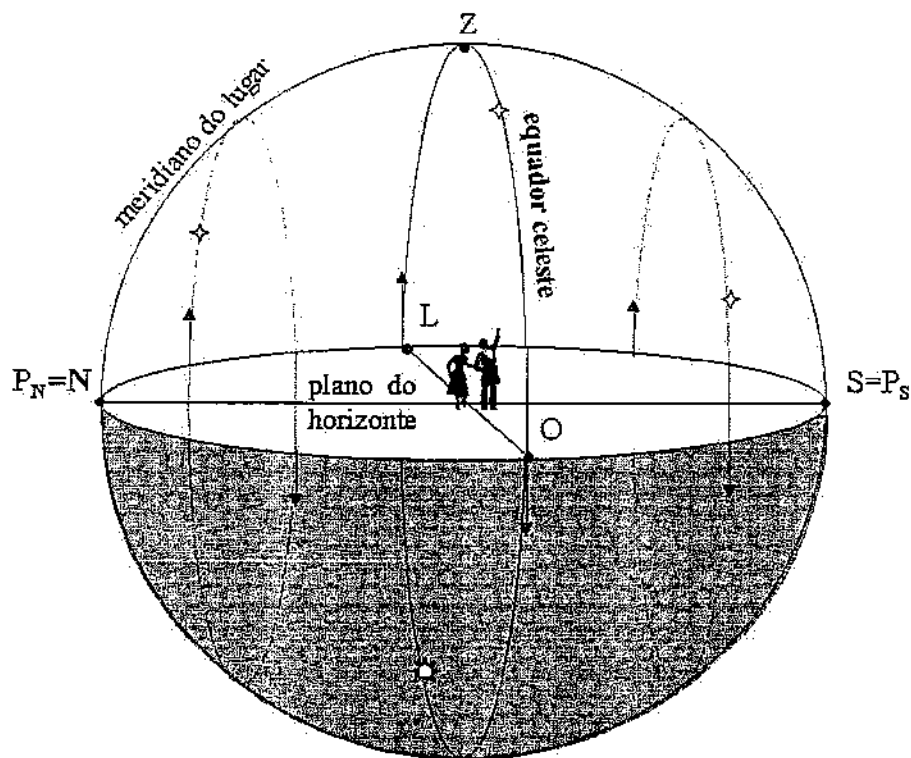


FIGURA 1.4 - VISÃO TOPOCÊNTRICA DA ESFERA CELESTE A PARTIR DO EQUADOR.

Se alguém se situar exatamente em um dos pólos de rotação da Terra (latitude $+90^\circ$ ou -90° e longitude indeterminada), a visão do céu será completamente diferente da anterior. Nessa situação extrema, o círculo do equador celeste coincide com o do horizonte e o pólo celeste respectivo com o zênite (Z). As trajetórias dos astros no céu ocorrem de modo paralelo ao plano do horizonte, como é visualizado na Figura 1.5. Somente um hemisfério celeste é observado. Se estivermos no pólo sul, avistaremos somente a metade sul do céu como é o caso da mesma figura. Os astros situados nesse hemisfério celeste nunca se “escondem” abaixo do plano do horizonte. Há noites de 24 horas (quando o Sol estiver abaixo do horizonte) e vice-versa no caso dos “dias claros”, quando ocorre o chamado sol da meia-noite. Os dias civis são de 24 h durante toda a primavera local, todo o verão, início do outono e fim do inverno, de modo que as noites civis de 24 h ocorrerão no restante do ano. Os dias astronômicos abrangem períodos maiores do início do outono local e fim do inverno, além de toda a primavera e verão.

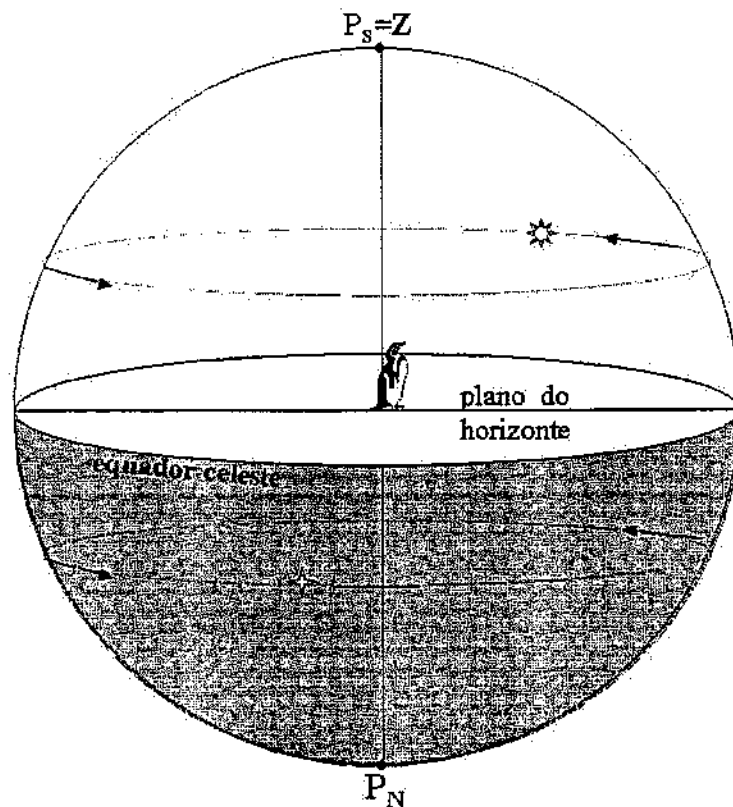


FIGURA 1.5 - VISÃO TOPOCÊNTRICA DA ESFERA CELESTE A PARTIR DO PÓLO SUL.

O QUE É ZÊNITE?

O zênite nada mais é que o ponto imaginário no céu exatamente acima de nossa cabeça. Quando falamos que o Sol ou qualquer astro está a pino, ele está cruzando o zênite do lugar. Para determinarmos a direção do zênite, basta estendermos o fio de prumo (usado em construção civil), imaginando que o prolongamento desse fio interceptará a esfera celeste no zênite. O gnômon astronômico aponta simultaneamente para o zênite e para o centro da Terra.

1.5 ESTAÇÕES DO ANO

1.5.1 MOVIMENTO ANUAL DO SOL E ECLÍPTICA

Os primeiros astrônomos começaram a perceber que o Sol se movia lentamente contra o fundo do céu, definido pelas estrelas e constelações. Faziam isso observando as constelações que são vistas, na direção do poente, logo após o pôr do Sol (antes de se “porém”) e aquelas que são ofuscadas pelo brilho solar um pouco antes do nascer do Sol na direção do nascente. Notaram que, gradualmente, as constelações situadas a leste do Sol deixam de ser vistas devido ao ofuscamento pela claridade solar e que as constelações a oeste do Sol passam a ser visualizadas. Como as estrelas eram consideradas fixas na esfera celeste (o que só é válido em primeira aproximação), eles concluíram que era o Sol que se movimentava. Esse movimento, denominado movimento anual aparente do Sol, faz com que este se desloque cerca de 1 grau por dia (de oeste para leste). Daí a origem do círculo geométrico de 360° (provavelmente no Egito Antigo).

O movimento anual do Sol define no céu uma trajetória circular, a qual foi denominada eclíptica, porque é onde a Lua se situa na ocasião de um eclipse (veja Figura 1.10). O plano dessa trajetória circular anual do Sol é inclinado em relação ao plano do equador celeste, em cerca de 23°,5 (veja Figura 1.7). O plano da eclíptica define o plano da órbita da Terra em torno do Sol. O círculo da eclíptica é, simplesmente, a projeção de seu respectivo plano na esfera celeste. Ao longo da direção da eclíptica no céu foram

concebidas, pelos povos antigos da Mesopotâmia, as constelações do Zodíaco, associadas a lendas e mitos desses povos (leia também ANO SOLAR E LUNAÇÃO, na seção PERCEPÇÃO E CONTAGEM DO TEMPO).

1.5.2 SOLSTÍCIOS E EQUINÓCIOS

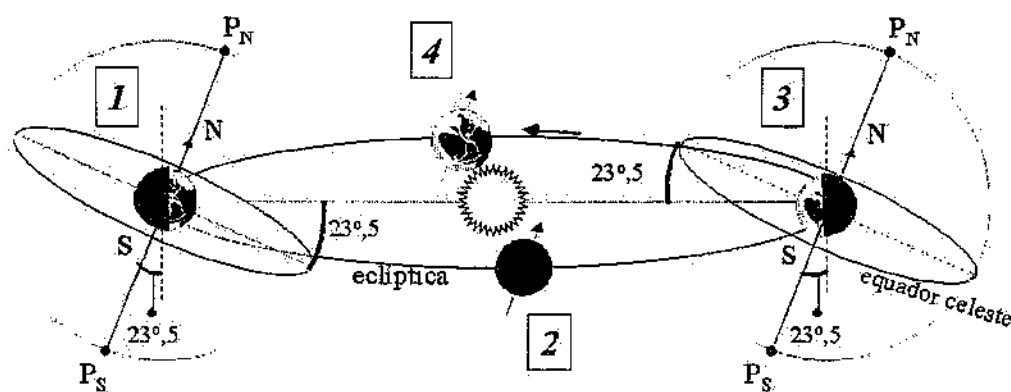
O movimento anual aparente do Sol na esfera celeste pode ser entendido através da translação da Terra em torno do Sol (visão heliocêntrica em conjunto com a visão geocêntrica), ou da observação do pôr do Sol (visão topocêntrica).

A Figura 1.7 mostra a Terra em quatro ocasiões especiais de sua órbita ao redor do Sol. São os dias em que ocorrem os solstícios e equinócios. Tomemos como referência o hemisfério sul da Terra. Na posição 1, fixando nossa visão a partir da Terra, o Sol está na distância angular máxima ao norte do plano do equador celeste, parecendo parar na esfera celeste para depois retroceder, para o sul, em seu movimento anual aparente. Os raios solares, nessa época do ano, incidem mais obliquamente sobre a superfície do hemisfério sul da Terra, de forma que a incidência de calor é menor. Esse dia é denominado solstício do inverno austral (solstício significa Sol parado; em latim: *solstitium*), o qual ocorre por volta de 22 de junho. A noite do solstício do inverno austral é a mais longa do ano. A partir do solstício de inverno, tanto os “dias claros” como os dias civis e astronômicos voltam a aumentar de duração, lentamente.

De modo análogo, na posição 3 da Figura 1.7, quando ocorre o “dia claro” mais longo do ano para o hemisfério sul, o Sol atinge a posição angular mais ao sul do equador celeste. É o dia do solstício do verão austral, que ocorre por volta de 21 de dezembro. No verão, a incidência dos raios solares acontece de forma menos oblíqua à superfície. Em lugares próximos ao Trópico de Capricórnio, a incidência é quase perpendicular. Portanto, a insolação é maior. Após o solstício de verão, os “dias claros” se tornam cada vez mais curtos novamente.

Em duas ocasiões especiais intermediárias (posições 2 e 4 da Figura 1.7), o “dia claro” e a noite têm a mesma duração (isso ocorre para todo o globo terrestre). São os dias dos equinócios de primavera e outono, que ocorrem, respectivamente, em torno de 22 de setembro e 21 de março no hemisfério sul. A palavra equinócio, de origem latina, significa noites de iguais duração. Os equinócios ocorrem quando o Sol está sobre o

círculo do equador celeste, caminhando do hemisfério celeste norte para o sul, no caso do equinócio da primavera austral, e fazendo o caminho inverso, no equinócio do outono austral. Nesses dias, ambos os hemisférios terrestres recebem a mesma quantidade de insolação. Entre o início do outono austral e o fim do inverno, os “dias claros” são mais curtos do que as noites (a noite mais longa ocorre no início do inverno), e entre o início da primavera e o fim do verão, a situação se inverte (o dia mais longo ocorre no início do verão).



1 e 3: solstícios

2 e 4: equinócios

FIGURA 1.7 - OS INÍCIOS DAS ESTAÇÕES DO ANO ATRAVÉS DAS PERSPECTIVAS HELIOCÊNTRICA E GEOCÊNTRICA (A ILUSTRAÇÃO ESTÁ FORA DE ESCALA).

Sequencialmente, para o hemisfério sul da Terra, tem-se: o equinócio de outono em 20 ou 21 de março, o solstício de inverno entre 21 e 23 de junho, o equinócio de primavera em 22 ou 23 de setembro e o solstício de verão entre 21 e 23 de dezembro. As estações do ano acontecem de forma inversa em cada um dos hemisférios terrestres. Enquanto é verão no hemisfério sul, é inverno no hemisfério norte.

A fim de complementar o entendimento, vamos pensar na observação do nascer e pôr do Sol nos dias dos equinócios e solstícios, como está representado na Figura 1.8, para um local na região tropical do hemisfério sul (entre o equador e o Trópico de Capricórnio). Somente nos equinócios o Sol surge no horizonte exatamente a partir do ponto cardinal leste, caminhando ao longo do dia sobre o equador do céu e se escondendo, exatamente também, no ponto cardinal oeste (isso ocorre para quase toda a Terra; as exceções são os pólos geográficos). Os solstícios são os dias em que o Sol mais se distancia dos pontos cardiais leste e oeste, no nascer e ocaso, respectivamente. No solstício do verão austral, o Sol surge o mais ao sul do ponto leste e esconde-se, com o mesmo distanciamento, ao sul do ponto oeste. No solstício do inverno austral, o Sol nasce com o maior afastamento angular ao norte do ponto leste e põe-se, com o mesmo distanciamento, ao norte do ponto oeste (veja Figura 1.8). O distanciamento angular máximo que a direção do Sol pode assumir em relação ao equador celeste é exatamente igual à inclinação entre o plano da eclíptica e o plano do equador ($\cong 23^{\circ},5$). O ângulo entre a direção do Sol e a do ponto cardinal leste, medido sobre o círculo do horizonte no momento do nascer do Sol em qualquer dia do ano depende da latitude do lugar e da declinação do Sol, exceto nos equinócios quando esse ângulo é nulo.

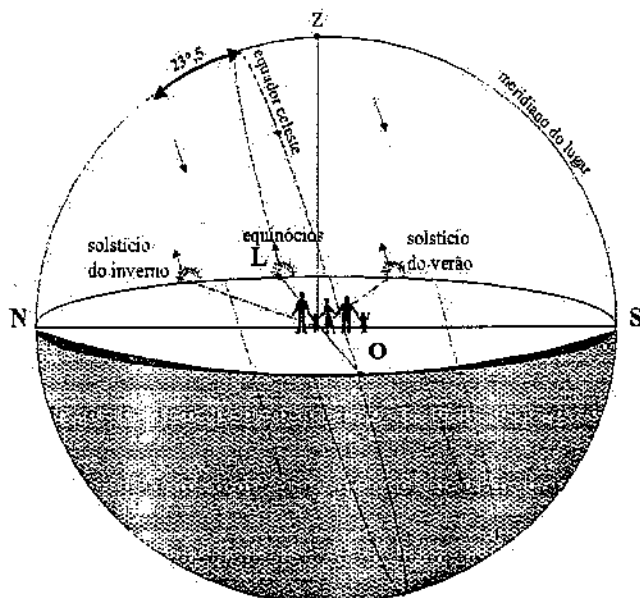


FIGURA 1.8 - VISÃO TOPOCÊNTRICA PARA O NASCER DO SOL NOS SOLSTÍCIOS E EQUINÓCIOS PARA UM LUGAR TROPICAL DO HEMISFÉRIO SUL DA TERRA.

SOL A PINO E TRÓPICOS

Somente na região tropical, o Sol pode ficar a pino ao meio-dia (solar). Entre os trópicos isto acontece duas vezes por ano, como no caso da Figura 1.8, e os dias correspondentes são determinados pela latitude do lugar. Para um local no equador terrestre, o Sol cruza a pino o meridiano local nos dias dos equinócios. Já para os locais situados exatamente sobre um dos trópicos, o Sol cruza a pino somente uma vez, no solstício de verão. Os Trópicos de Capricórnio e Câncer são nomeados desta maneira porque durante os solstícios, na Antigüidade, o Sol se encontrava na direção dessas constelações zodiacais.

1.5.3 INCLINAÇÃO DO EIXO DE ROTAÇÃO DA TERRA

O ângulo formado entre o eixo de rotação da Terra e a perpendicular da eclíptica é, exatamente, igual à separação angular entre o plano do equador da Terra e o plano da órbita terrestre (eclíptica). A Figura 1.7 ilustra essa inclinação do eixo de rotação da Terra.

Na época atual, a inclinação entre o plano do equador e o da eclíptica é de aproximadamente $23^{\circ},5$ (exatamente $23^{\circ} 27' 08''$). Se, por acaso, a inclinação fosse 0° , ou seja, a Terra girasse com o seu eixo perpendicularmente ao plano da eclíptica, todos os “dias claros” e noites teriam sempre a mesma duração (12 h); seria um eterno equinócio (os planos da eclíptica e do equador coincidiriam) e não existiriam as estações do ano.

A inclinação do eixo da Terra muda com o tempo, porque esta se movimenta semelhante a um pião que gira obliquamente ao chão. Um dos movimentos, denominado precessão dos equinócios, faz o eixo da Terra girar em torno da perpendicular da eclíptica. Outro movimento, chamado nutação, faz o ângulo dessa inclinação oscilar em torno de um valor médio. Ambos os movimentos são determinados pela interação gravitacional da Lua, Sol e planetas sobre a Terra, em função desta não ser uma esfera perfeita. O movimento de precessão tem um período de cerca de 25.800 anos produzindo, na prática, uma modificação lenta e gradual nas datas dos solstícios e equinócios, antecipando-as. Com relação às observações astronômicas, esses movimentos alteram lentamente as coordenadas equatoriais dos astros, em virtude

de modificarem a direção dos pólos celestes. Hiparco, antigo astrônomo grego (200 a.C.), já havia notado os efeitos da precessão dos equinócios, ao comparar as suas medidas de posição de estrelas com outras feitas tempos atrás. Para a Astrologia, esses movimentos não são levados em conta, provocando inclusive uma separação gradual entre a posição dos signos e suas respectivas constelações originais. Por exemplo, o autor deste capítulo, que nasceu no dia 23 de maio, é do signo de Gêmeos segundo a Astrologia, mas o Sol nessa data está na direção da constelação de Touro.

1.5.4 GEOCENTRISMO, HELIOCENTRISMO E TRANSLAÇÃO

Do ponto de vista terrestre (visão geocêntrica), o Sol parece completar uma volta em torno da Terra em um ano. O mesmo ocorre com a Lua e os planetas, só que em períodos distintos. Todos esses astros possuem movimentos anuais aparentes com trajetórias próximas à trajetória do Sol, no mesmo sentido do movimento solar (de oeste para leste). Daí a origem do modelo geocêntrico, que tentou explicar os movimentos desses astros errantes por entre as constelações zodiacais; todos caminhando em torno da Terra imóvel. O geocentrismo perdurou até surgir o heliocentrismo, que explicava de forma mais simples alguns movimentos “estranhos” que os planetas realizavam no céu. Esses movimentos peculiares dos planetas faziam os mesmos retrocederem na sua trajetória padrão oeste-leste, alguns deles traçando até mesmo pequenas trajetórias em forma de laços. Além do mais, o heliocentrismo de Copérnico foi sustentado pela Teoria da Gravitação Universal elaborada por Newton (leia mais no Capítulo 3).

O modelo heliocêntrico associado à Gravitação Universal explicou como a Terra e os demais planetas orbitam em torno do Sol. Esse movimento é denominado translação (ao redor do Sol). O movimento de translação da Terra acontece num plano, aquele da eclíptica. A órbita da Terra não é um círculo perfeito, mas sim uma elipse pouco excêntrica (quase circular). Em primeira aproximação, o Sol ocupa um dos focos da elipse, como representado na Figura 1.9. Na verdade, a Terra translada em torno do centro de massa do Sistema Solar (leia o Capítulo 3 e a caixa de texto O QUE É CENTRO DE MASSA? da seção seguinte). A translação da Terra pode ser chamada de movimento orbital. A velocidade média de translação é de cerca de 107.000 km/h (ou 30 km/s). Definitivamente, nós não estamos imóveis no Universo.

O movimento de translação da Terra ocorre no mesmo sentido da sua rotação (de oeste para leste). Aplica-se a regra da mão direita a fim de visualizá-lo. Nunca é demais lembrar que a perpendicular da eclíptica e o eixo da Terra não coincidem.

A velocidade de translação da Terra foi obtida por medição direta astronômica em 1729 através dos trabalhos do físico inglês James Bradley, o qual visava medir distâncias de estrelas. Bradley observou algo inesperado: a luz das estrelas sofria um desvio sistemático de direção. A explicação é dada pela combinação da velocidade da Terra ao redor do Sol (30 km/s em média) com a velocidade da luz (300.000 km/s). Esse efeito é denominado de aberração da luz.

Alguém poderia afirmar que as estações do ano decorrem da variação da distância Terra-Sol, contudo esta pessoa deve lembrar que as estações ocorrem alternadamente em ambos os hemisférios terrestres. Mesmo que a variação na distância acarrete pequenas alterações no fluxo de luz solar recebido pela Terra, 6,5% no máximo, não há consequências maiores para as estações do ano. Quando é verão no hemisfério sul, a Terra encontra-se mais próxima do Sol do que quando é verão no hemisfério norte (Figura 1.9), mas nem por isso o verão é mais intenso no hemisfério sul.

ANO SIDERAL

O intervalo de tempo que a Terra leva para transladar completamente em torno do Sol depende do referencial assumido. No caso do ano solar, a referência é o próprio Sol. Já o ano sideral é o intervalo de tempo entre duas passagens consecutivas da Terra pelo mesmo ponto de sua órbita, dado em referência às estrelas. Enquanto o ano solar tem 365,2422 dias (solares), o ano sideral tem 365,25636; ou seja, o ano sideral é mais longo cerca de 20 min. Você poderia perguntar agora: - Por que não se adota o ano sideral no calendário? Simplesmente porque os inícios das estações do ano são determinados pelo ano solar e não pelo sideral. Se usássemos o ano sideral, a cada 72 anos as estações do ano começariam um dia mais cedo, pois estaríamos acrescentado um dia ($20 \text{ min/ano} \times 72 \text{ anos} = 24 \text{ h}$). Com o passar dos anos, a diferença entre o início real de uma estação e o seu início no calendário aumentaria, chegando a 1 mês após 2.160 anos.

UNIDADE ASTRONÔMICA

O semi-eixo maior da órbita elíptica da Terra ao redor Sol é de 149.597.870 km, sendo denominada de unidade astronômica (UA). Veja a definição de elipse no Capítulo 3. A distância Terra-Sol varia de um valor mínimo, em torno de 147 milhões de quilômetros, a um máximo por volta de 152 milhões de quilômetros.

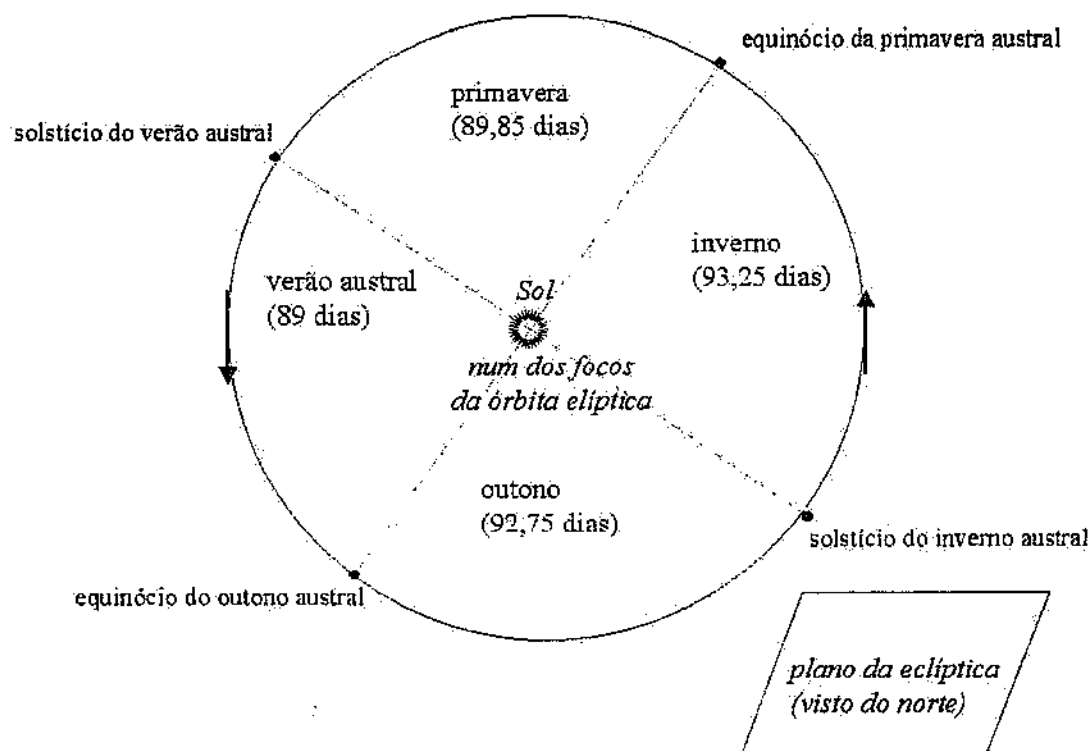


FIGURA 1.9 - A TRANSLAÇÃO DA TERRA (VISTA DO NORTE DA ECLÍPTICA), COM OS INÍCIOS DAS ESTAÇÕES DO HEMISFÉRIO SUL ASSINALADOS (ILUSTRAÇÃO FORA DE ESCALA).

1.5.5 ASPECTOS DO CÉU EM DIFERENTES ESTAÇÕES

A partir da visão da Terra, o Sol parece atravessar as constelações zodiacais anualmente, como se pode entender através da Figura 1.10. Quando o Sol se dispõe na direção de uma determinada constelação do Zodíaco, esta e várias outras ao norte e ao sul não podem ser visualizadas. Grande parte de uma faixa de quase 18 graus da esfera celeste (em ascensão reta centrada no Sol) não é visualizada devido ao ofuscamento

pelo Sol. Imagine que o céu fosse um gigantesco balão esférico de São João (sem boca) de tal modo que os pólos celestes fossem os dois pontos de encontro de todos os 20 gomos de largura de 18° cada. O Sol estaria no centro deste balão e a Terra (com rotação diária) transladaria dentro do balão ao redor do Sol central (como na Figura 1.10). A faixa de ascensão reta ofuscada pelo Sol corresponderia ao gomo do balão que estivesse na direção do Sol. Consequentemente, todos os demais “gomos” do céu poderiam ser observados ao longo da noite. O “gomo” celeste diametralmente oposto àquele ofuscado pelo Sol seria avistado preferencialmente à meia-noite. Vale lembrar que a extensão (norte-sul) visível de cada “gomo” celeste avistado seria dependente da posição em latitude do observador na Terra (veja ASPECTOS DO CÉU EM DIFERENTES LATITUDES, na seção DIAS E NOITES). Para as regiões equatoriais, poderíamos observar praticamente toda extensão de cada “gomo”. A partir do hemisfério sul da Terra, observaríamos preferencialmente a extensão sul dos “gomos”.

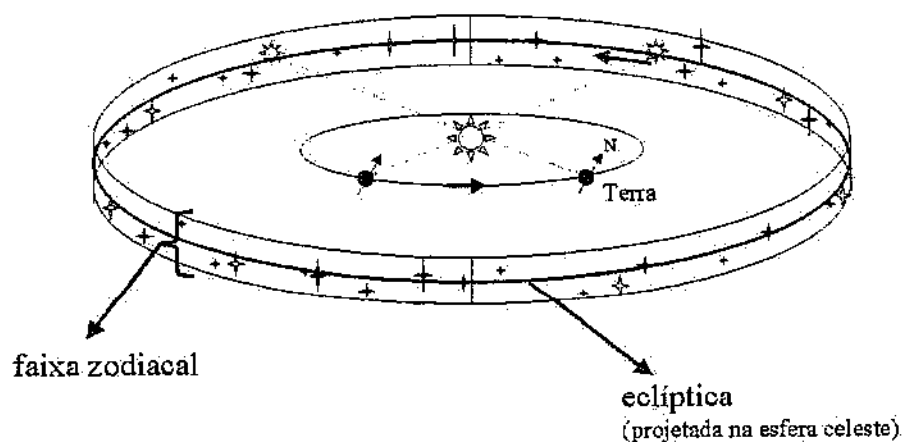


FIGURA 1.10 - MOVIMENTO APARENTE ANUAL DO SOL POR ENTRE AS CONSTELAÇÕES ZODIACIAS DEVIDO À TRANSLAÇÃO DA TERRA (ILUSTRAÇÃO FORA DE ESCALA).

A fim de ilustrar melhor, pensemos no caso do Brasil, mais especificamente na latitude de São José dos Campos. Nessa situação, o pólo celeste elevado é o Sul. Vamos fixar um determinado horário, 21h (tempo civil), para a observação do aspecto do céu noturno.

Na Tabela 1.1 são apresentadas as constelações mais fáceis de serem identificadas quanto à localização das mesmas na esfera celeste para o meio de cada estação. As constelações do Zodíaco são listadas conforme suas disposições de leste para oeste no céu. O(s) nome(s) da(s) estrela(s) mais brilhante(s) correspondente(s), facilmente observada(s) a olho nu, é(são) apresentada(s) entre parênteses para algumas constelações.

CONSTELAÇÕES ZODIACAIS

As constelações zodiacais representam, em sua maioria, contornos de animais; vem daí essa nomenclatura de origem grega (do grego *zodiakós*; *zoo*: animais e *kyklos*: círculo). Originalmente, foram concebidas pelos povos sumerianos, Antiga Mesopotâmia, e adaptadas pela antiga cultura grega. Classicamente, as constelações do Zodíaco são em número de doze. Contudo, existe mais uma que se situa na direção da eclíptica: é a constelação do Ofiúco ou Serpentário, a qual foi concebida na mesma época das demais.

As Figuras 1.11 a 1.14 mostram as configurações projetadas do céu, no plano do horizonte, para esse local às 21h nessas datas. Para utilizar essas cartas celestes sazonais com o intuito de reconhecimento do céu noturno, você deve segurá-las acima de sua cabeça fazendo coincidir as direções N-S e L-O com a orientação geográfica local (é preferível ficar de frente para o Sul).

BANDEIRA NACIONAL

A bandeira da República Federativa do Brasil possui um círculo azul estrelado. As estrelas representam os 26 estados brasileiros e o Distrito Federal, estando dispostas numa configuração espelhada para o céu do Rio de Janeiro, no momento da proclamação da República (8h30min, 15/11/1889). Em especial, podemos visualizar a constelação do Cruzeiro do Sul (invertida da esquerda para direita), como hipoteticamente seria vista de fora da esfera celeste.



TABELA 1.1 - CONSTELAÇÕES VISÍVEIS POR ESTAÇÃO DO ANO PARA O HEMISFÉRIO SUL.

	Zodiacais	Austrais (S)	Equatoriais	Boreais (N)
Verão	Câncer ou Caranguejo, Gêmeos (Castor e Pollux), Touro (Aldebaran) e Áries ou Carneiro.	Cão Maior (Sirius).	Órion (Betelgeuse, Rigel e as "Três Marias").	Cocheiro (Capella) e as zodiacais da estação.
Outono	Libra ou Balança, Virgem (Spica) e Leão (Regulus).	Cruzeiro do Sul (Acrux, Mimosa e Gacrux), Centauro (Rigel Kent e Hadar) e Libra.	Virgem.	Boieiro (Arcturus) e Leão.
Inverno	Capricórnio, Sagitário, Ofiúco e Escorpião (Antares).	As zodiacais da estação e Centauro (Rigel Kent e Hadar).	Águia (Altair) e Ofiúco.	Cisne (Deneb), Lira (Vega) e Hércules.
Primavera	Peixes, Aquário e Capricórnio.	Grou (Al Na'ir), Peixe Austral (Formalhaut), Eridano (Achernar) e Capricórnio.	Peixes e Aquário.	Andrômeda e Pégaso.

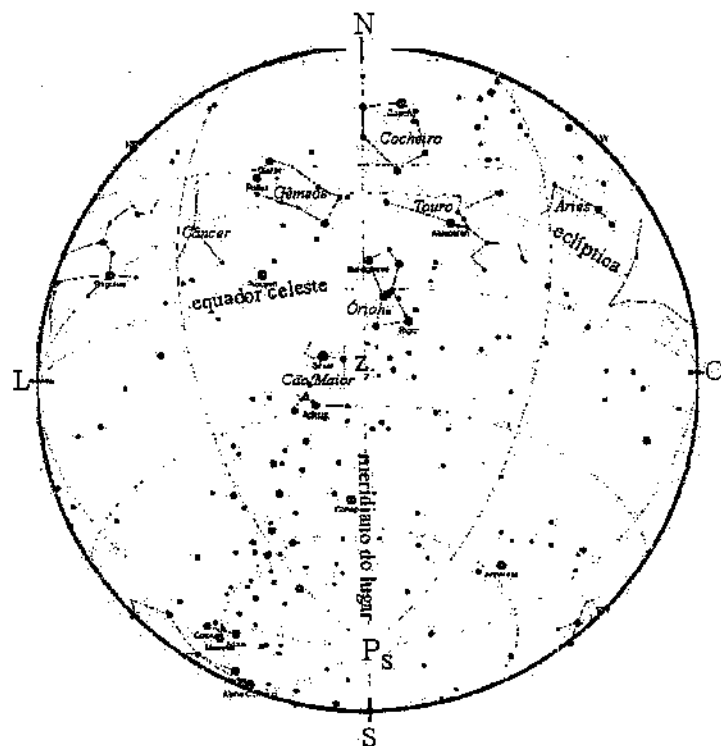


FIGURA 1.11 - PROJEÇÃO DO CÉU PARA SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, ÀS 21H, PARA O MEIO DO VERÃO.

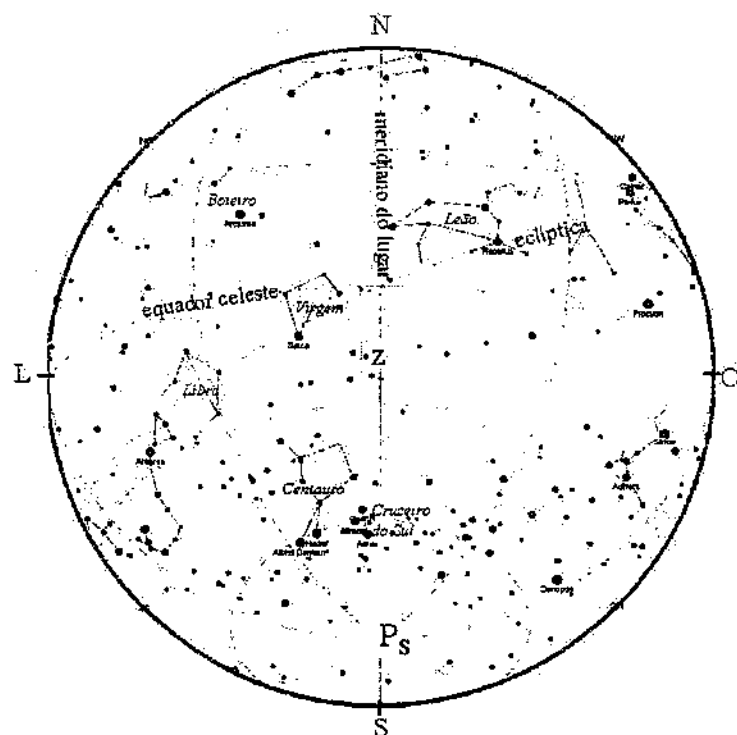


FIGURA 1.12 - PROJEÇÃO DO CÉU PARA SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, ÀS 21H, PARA O MEIO DO OUTONO.

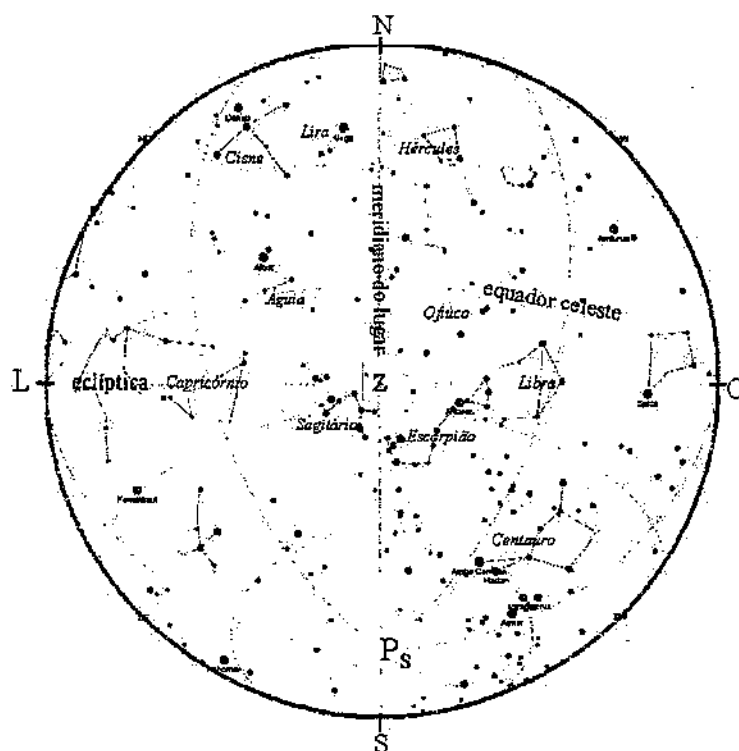


FIGURA 1.13 - PROJEÇÃO DO CÉU PARA SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, ÀS 21H, PARA O MEIO DO INVERNO.

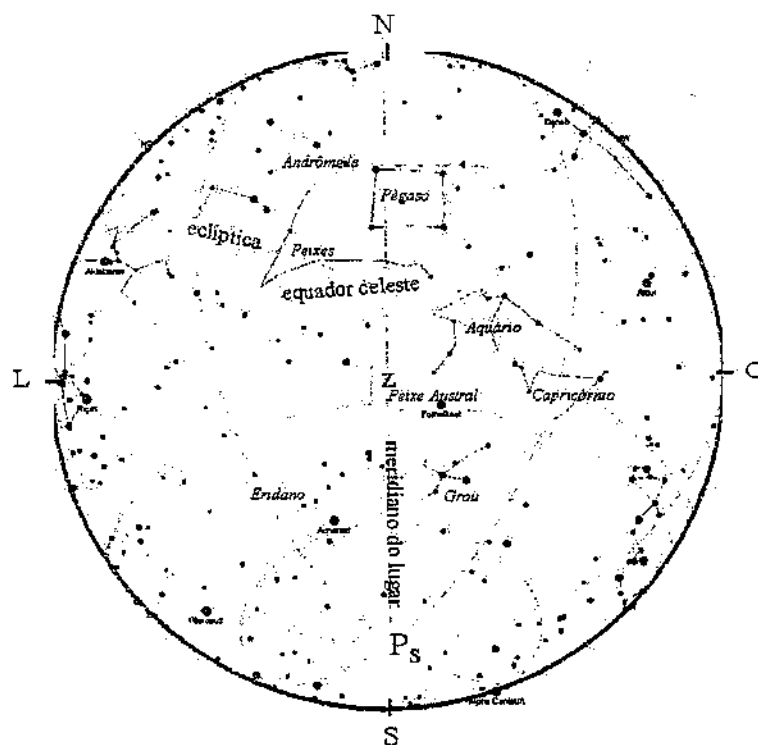


FIGURA 1.14 - PROJEÇÃO DO CÉU PARA SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, ÀS 21H, PARA O MEIO DA PRIMAVERA.

1.6 FASES DA LUA

A Lua é o único satélite natural da Terra. Foi denominada, na antigüidade, de *Luna*, antiga cidade de Tucana (Itália) pelos romanos e *Selene*, irmã de Hélios e filha de Hipérion e Téia pelos gregos. É o astro mais brilhante do céu noturno.

As fases da Lua correspondem aos diferentes aspectos com que esta se apresenta no céu ao longo das noites e dos “dias claros” de um mês. Isso não é devido à projeção da sombra da Terra na Lua, como alguns podem pensar. Mas sim, devido à visualização que temos da Lua conforme ela orbita em torno da Terra (posição relativa entre a Lua, Terra e Sol). A fase da Lua é um fenômeno astronômico de observação simultânea para todo o globo terrestre (quando a Lua cheia é vista do Brasil, ela é também vista como tal em Portugal).

Com certa regularidade, a Lua ora atravessa a sombra da Terra (eclipse da Lua), ora projeta sua sombra na superfície terrestre (eclipse do Sol).

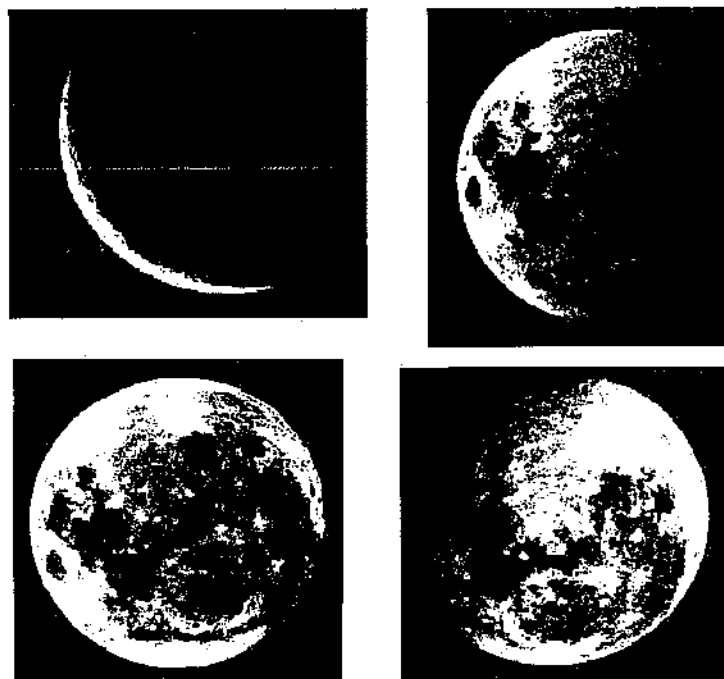


FIGURA 1.15 - A LUA EM FASES DISTINTAS (FOTOS DE ANDRÉ MILONE, NO OBSERVATÓRIO DO VALONGO/UFRJ, RIO DE JANEIRO, 1988).

1.6.1 ASTROS LUMINOSOS E ILUMINADOS

O Sol, assim como as outras estrelas, são astros que produzem e emitem radiação eletromagnética em vários comprimentos de onda (ver os Capítulos 2 e 4); ou seja, são fontes de ondas de rádio, microondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios X e raios gama, em ordem crescente de energia luminosa. A Lua, os planetas (incluindo a Terra) e os corpos menores do Sistema Solar são astros iluminados pelo Sol. Portanto, a Lua e os planetas são visualizados por nós simplesmente porque refletem a luz visível solar incidente. A superfície da Lua reflete cerca de 7% da luz solar incidente.

1.6.2 TRANSLAÇÃO DA LUA

O intervalo de tempo que a Lua gasta para completar uma volta completa em torno do centro de massa do sistema Terra-Lua, em relação ao referencial das estrelas, é chamado de período sideral; é igual a 27 dias, 7 horas, 43 minutos e 12 segundos (solares). Já o intervalo de tempo entre duas fases iguais sucessivas (ex. duas fases cheias) é denominado período sinódico ou, simplesmente, lunação; relativo ao referencial terrestre. Uma lunação dura 29 dias, 12 h, 44 min e 3 s (solares), maior que o período sideral; é a base dos calendários lunares. Veja também a seção PERCEPÇÃO E CONTAGEM DO TEMPO.

O movimento orbital da Lua (ao redor da Terra, em primeira aproximação) é realizado no mesmo sentido dos movimentos orbital e rotacional da Terra, ou seja, ocorre de oeste para leste. É fácil perceber isso: a Lua sempre “nasce” cerca de 50 minutos mais tarde, dia após dia, em consequência de seu movimento de oeste para leste. Aplicando-se novamente a regra da mão direita com o polegar para cima apontando para o norte, tem-se que a Lua translada ao redor da Terra no mesmo sentido que a Terra translada ao redor do Sol. A Figura 1.16 ilustra o movimento de translação da Lua.

A órbita da Lua não é circular mas sim elíptica, de modo que num dos focos da elipse se localiza o centro de massa do sistema Terra-Lua e não o centro da Terra como se poderia pensar. A distância entre os centros da Lua e Terra varia de 357.300 km a 407.100 km. A velocidade média de translação da Lua fica em torno de 3.700 km/h.

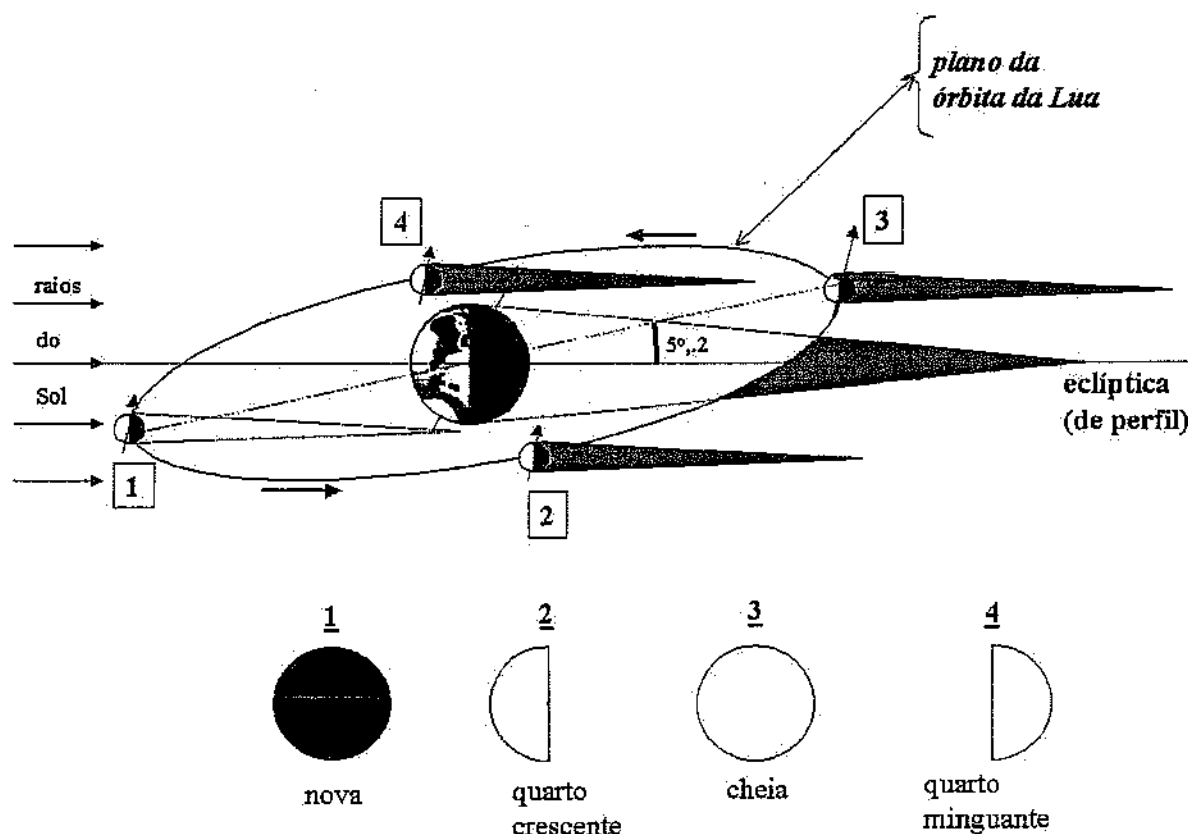


FIGURA 1.16 - A TRANSLAÇÃO DA LUA: SUAS FASES PRINCIPAIS COMO SÃO VISTAS DO HEMISFÉRIO SUL DA TERRA (ILUSTRAÇÃO FORA DE ESCALA).

O QUE É CENTRO DE MASSA?

Centro de massa de um corpo corresponde ao centro geométrico de sua distribuição de massa. É o ponto onde toda a massa do corpo pode ser concentrada para efeito cinemático. O centro de massa pode se situar dentro ou fora do corpo. Por exemplo, no caso de uma bola de futebol, o centro de massa localiza-se no centro dela; no caso de uma aliança de casamento o centro de massa situa-se no seu centro geométrico, externo ao meio material da aliança. O conceito de centro de massa pode ser aplicado para qualquer distribuição de matéria, inclusive para dois corpos. Sua localização depende das características da distribuição de massa (forma geométrica e densidade de matéria). Para dois corpos exatamente iguais (em forma, massa e densidade), o centro de massa do sistema está localizado no ponto equidistante de ambos. Se um dos dois corpos tiver maior massa, o centro de massa situar-se-á mais próximo dele.

1.6.3 ROTAÇÃO DA LUA E SUA FACE OCULTA

Além do movimento orbital ao redor da Terra, a Lua também possui um movimento de rotação em torno de si mesma.

O movimento rotacional da Lua também ocorre no mesmo sentido do seu movimento orbital. Pode-se usar a regra da mão direita para a sua visualização. A seta sobre a Lua, na Figura 1.16, ilustra o pólo norte de rotação; seria o polegar da mão direita.

A face “oculta” é a parte da Lua que não podemos avistar a partir da superfície terrestre (Figura 1.17). Em virtude do movimento orbital da Lua estar sincronizado com sua rotação (em 1:1), por questão de equilíbrio dinâmico evolutivo, a Lua tem sempre a mesma parte voltada para a Terra. Seu período de rotação é igual ao seu período sideral de translação: um dia na Lua dura cerca de 27 dias solares da Terra.

A face oculta não corresponde a 50% da superfície lunar. Do ponto de vista terrestre, pode-se avistar mais da metade da Lua, devido a um movimento extra da Lua denominado libração, que é uma oscilação do seu eixo rotacional.

DEMONSTRE A SINCRONIA DOS MOVIMENTOS LUNARES

Enquanto uma pessoa fica parada representando a Terra (vamos fixar a Terra para um entendimento melhor), outra caminha em torno daquela, sempre com o rosto voltado para a Terra. Peça ao resto do grupo para observar se a pessoa que está representando a Lua girou em torno de si mesma. Ou, melhor ainda, pergunte se eles conseguiram visualizar outras partes da Lua além daquela vista pela Terra (ex. a nuca dessa pessoa). Faça-os refletir.

1.6.4 ASPECTOS DAS FASES LUNARES

Na fase de quarto crescente, a Lua está com a metade de seu hemisfério iluminado voltada para a Terra. Em certas ocasiões, com a forma parecida com a de um C para o hemisfério sul. Na fase cheia, toda a sua parte iluminada está voltada para a Terra. No quarto minguante, a Lua está com a outra metade de seu hemisfério iluminado voltada para a Terra; forma parecida com um D para o hemisfério sul, em determinadas vezes.

Finalmente, na fase nova, é sua parte não-iluminada pelo Sol que fica voltada para a Terra (não conseguimos ver a Lua!). A Figura 1.16 mostra a Lua nessas quatro fases principais.

Na verdade, as fases da Lua ocorrem de modo contínuo. Na Astronomia, a fase da Lua é conceituada através da fração iluminada do disco lunar voltado para a Terra, que pode ser quantificada de forma percentual ou não. Na fase nova, essa fração é nula, 0,5 (ou 50%) no quarto crescente, 1,0 (ou 100%) na fase cheia e novamente 0,5 no quarto minguante. Outro conceito astronômico adotado na definição da fase lunar é o ângulo Sol-Lua-Terra, denominado ângulo de fase, cujo vértice é a própria Lua. Esse ângulo na ocasião da Lua nova é próximo a 180° , 90° para o quarto crescente, próximo de zero para a fase cheia e novamente 90° para o quarto minguante.

A denominação “Lua crescente” é usada para representar o aspecto lunar entre as fases nova e cheia. O crescente lunar pode ser avistado no céu no fim da tarde e início da noite, sempre na parte oeste do céu. A Lua quarto crescente nasce ao meio-dia e se põe à meia-noite, aproximadamente.

A nomenclatura “Lua minguante” é adotada para o aspecto lunar entre as fases cheia e nova. Ao contrário da crescente, o minguante pode ser visto no fim da noite e início manhã, sempre a leste do meridiano local. A Lua quarto minguante nasce à meia-noite e se põe ao meio-dia do dia seguinte, aproximadamente.

A Lua cheia percorre o céu por praticamente toda a noite, surgindo por volta das 18h e se pondo em torno das 6h.

CURIOSIDADE: DIREÇÃO DO SOL E FASES DA LUA

Obviamente, a face iluminada da Lua aponta sempre para a direção do Sol. Isso pode ser aplicado para sabermos onde o Sol se põe no horizonte quando da fase crescente, ou de onde ele vai emergir quando a Lua é minguante. É interessante reparar que em muitas montagens fotográficas, exibindo a Lua no céu, há frequentemente equívocos astronômicos como, por exemplo, mostrando a Lua cheia próxima a um horizonte crepuscular.

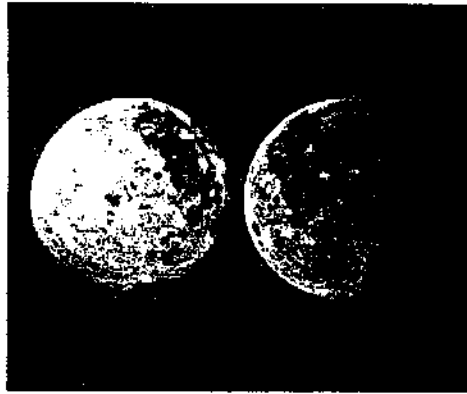


FIGURA 1.17 – A FACE OCULTA DA LUA VISUALIZADA EM DUAS IMAGENS. REPRE QUE A LUA ESTÁ NA SUA FASE NOVA!

1.7 ECLIPSES DA LUA E DO SOL

Na Astronomia, eclipsar significa esconder, encobrir, ou interceptar a luz vinda de um astro.

No Egito Antigo, os eclipses do Sol eram explicados como sendo ataques de uma serpente ao barco que transportava o Sol pelo céu. Os antigos chineses costumavam observar sistematicamente os fenômenos celestes. Registraram e previram diversos eclipses. Pensavam que um imenso dragão estivesse engolindo o Sol durante um eclipse solar. Então, faziam muito barulho para assustar o dragão e o Sol sempre reaparecia (nunca falhava!).

1.7.1 DISTÂNCIAS E DIMENSÕES DO SISTEMA SOL-TERRA-LUA

A olho nu, o tamanho angular da Lua é de aproximadamente $0^{\circ},5$. Por pura coincidência é semelhante ao tamanho angular do Sol. Deste modo, os dois parecem iguais em tamanho, porém não o são. Nota-se que a Lua está 400 vezes mais próximo da Terra do que o Sol, o qual é cerca de 400 vezes maior em diâmetro.

Hiparco (200 a.C.) calculou a distância e o tamanho da Lua por ocasião de um eclipse lunar, medindo a duração total da etapa umbral. Ele aplicou alguns conhecimentos geométricos, conjugados a outras medidas conhecidas na época (duração do mês lunar e dimensões angulares da Lua e do Sol).

A distância Terra-Sol em função da distância Terra-Lua foi calculada por Aristarco de Samus (300 a.C.). Ele observou simultaneamente a Lua em quarto crescente e o pôr do Sol. Quando o Sol estava no horizonte, Aristarco mediu a separação angular entre a Lua e o Sol, a qual representa um dos ângulos do triângulo retângulo Terra-Lua-Sol (Figura 1.18), cujo vértice do ângulo reto (90°) é a Lua. O ângulo medido ficou em torno de 87° proporcionando uma distância Terra-Sol de 7.300.000 km, muito abaixo do valor moderno (Tabela 1.2).

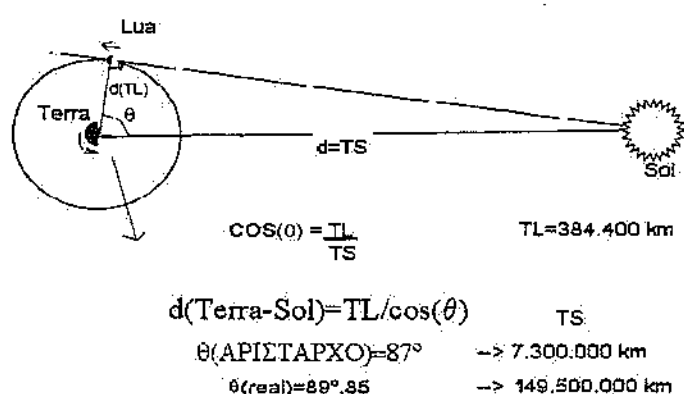


FIGURA 1.18 - CÁLCULO DA DISTÂNCIA TERRA-SOL FEITO POR ARISTARCO (300 A.C.).

TABELA 1.2 - ALGUNS DADOS FÍSICOS DO SOL, TERRA E LUA.

	Diâmetro equatorial	Massa (comparativa à Terra)	Volume (comparativo à Terra)	Distância média à Terra
Terra	12.756 km	1	1	-----
Lua	3.476 km	1/80	1/50	384.400 km
Sol	1.392.000 km	333.000	1.300.000	149.600.000 km

A Figura 1.19 esquematiza a ocorrência de um eclipse total da Lua. A Terra e a Lua estão representadas em tamanhos relativos proporcionais. Se a Terra tivesse 0,5 cm de diâmetro, a Lua deveria ter, aproximadamente, 12,5 mm de diâmetro. A distância Terra-Lua ($\cong 15$ cm), assim como a trajetória da Lua em volta da Terra, também são representadas em dimensões proporcionais. O Sol seria, nessa mesma escala relativa, uma esfera com aproximadamente 50 cm de diâmetro e estaria a uma distância de cerca 60 m à esquerda da folha de papel. O plano da órbita da Lua (em torno da Terra) não coincide com o plano da órbita da Terra (em torno do Sol). A órbita da Lua está apenas projetada na folha de papel, que está representando o plano da órbita da Terra. Deste modo, a trajetória da Lua está atravessando o papel na região da sombra da Terra.

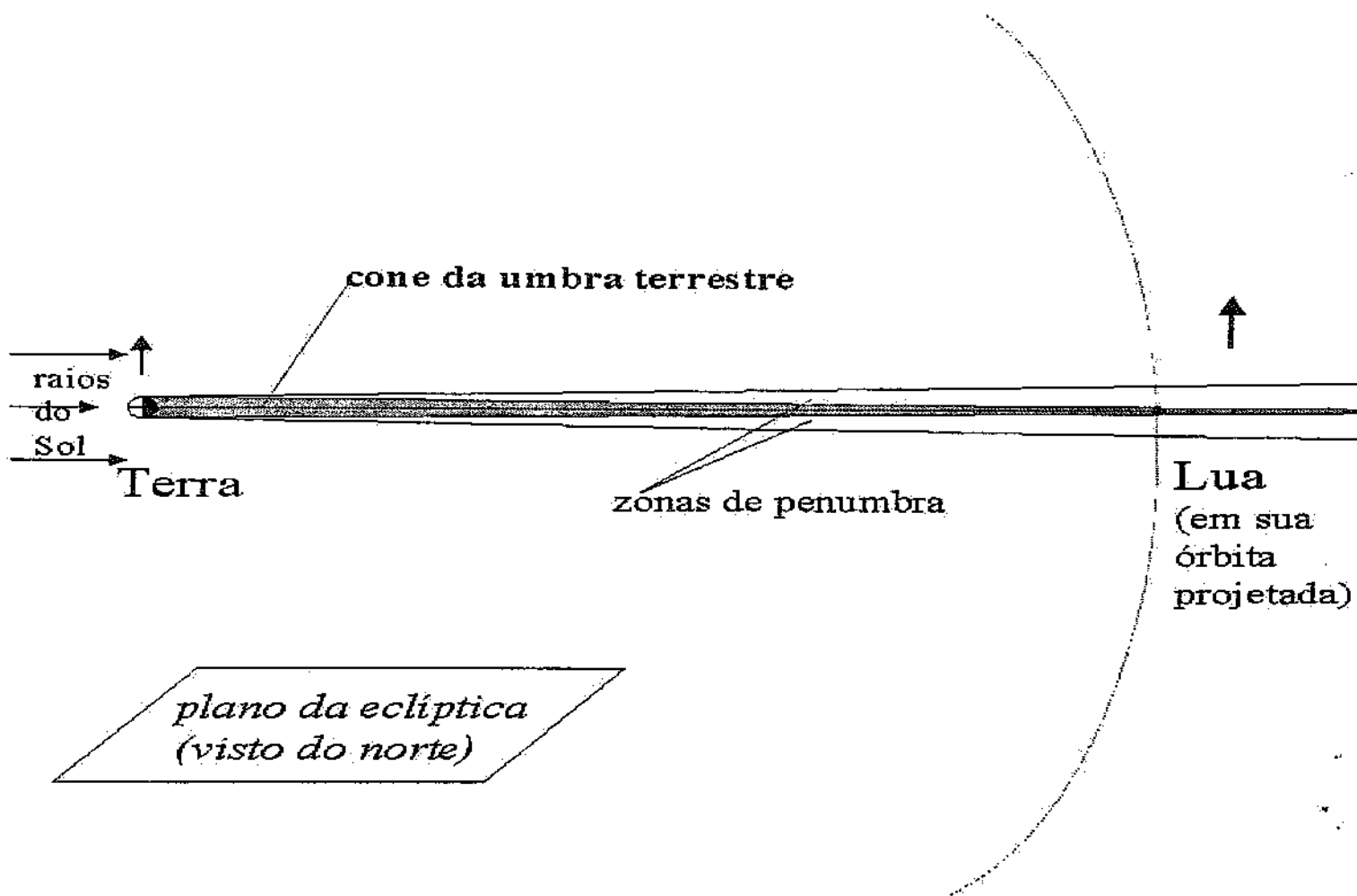


FIGURA 1.19 - ILUSTRAÇÃO EM ESCALA DE UM ECLIPSE TOTAL DA LUA.

1.7.2 TIPOS DE ECLIPSES

O Sol é uma fonte luminosa extensa. Tanto a Lua como a Terra projetam no espaço uma sombra em forma de um cone, cuja base é o próprio corpo, e uma penumbra. O cone de sombra situa-se interno à penumbra. Por definição, o cone umbral não recebe luz solar alguma e a penumbra não recebe luz de todos os pontos do disco solar. No entanto, para a Terra, que possui uma camada de ar ao seu redor, os limites do cone de sombra e da penumbra não são bem determinados. A luz do Sol é espalhada quando atravessa a atmosfera terrestre. O mesmo não ocorre para a Lua.

Os eclipses lunares somente ocorrem quando a Lua está na fase cheia. Num eclipse da Lua, ela percorre a penumbra e/ou a sombra da Terra. Apenas poderão ser observados do hemisfério da Terra onde é noite.

Há três tipos de eclipse da Lua: o total, o parcial e o penumbral. O eclipse lunar total acontece quando a Lua é totalmente obscurecida pelo cone de sombra da Terra, o parcial quando somente parte da Lua é obscurecida por esse cone e o penumbral quando a Lua percorre apenas a zona da penumbra terrestre (é o menos pronunciável dos três). Na ocasião de um eclipse total ou parcial, a Lua percorre a região de penumbra antes e depois de atravessar o cone umbral da Terra. A Figura 1.19 ilustra um eclipse total da Lua em escala.

Quando a Lua se situa na umbra terrestre durante um eclipse total, ela não é totalmente obscurecida em virtude da luz solar ser espalhada pela atmosfera da Terra. Pode-se avistar a Lua, freqüentemente, com uma coloração avermelhada em função do avermelhamento intenso da luz pela atmosfera de nosso planeta (veja Capítulo 2).

Os eclipses do Sol ocorrem quando a Lua (na fase nova) se coloca entre o Sol e a Terra, projetando sua sombra e/ou penumbra na superfície terrestre. Podem ser parciais ou totais.

O eclipse solar parcial é quando o Sol é parcialmente “encoberto” pelo disco lunar. Há projeção somente da zona de penumbra sobre a Terra. Um tipo especial de eclipse solar parcial é o anular: quando o Sol, a Lua e a Terra ficam alinhados mas devido a uma separação relativa maior da Lua à Terra, o Sol não é totalmente encoberto pela Lua restando apenas um anel visível do disco solar. O eclipse solar anular é observado

apenas da região da superfície terrestre que está exatamente naquele alinhamento Sol-Lua-Terra. Esse eclipse é observado apenas como parcial da região terrestre por onde a penumbra passa.

O eclipse solar total acontece quando a Lua projeta sobre a superfície terrestre tanto seu cone de sombra (a umbra lunar) como sua zona de penumbra (veja Figura 1.20). Da região da superfície da Terra por onde a umbra da Lua passa, o eclipse é observado realmente como total. Das regiões da Terra por onde somente a penumbra lunar passa, avista-se um eclipse solar parcial.

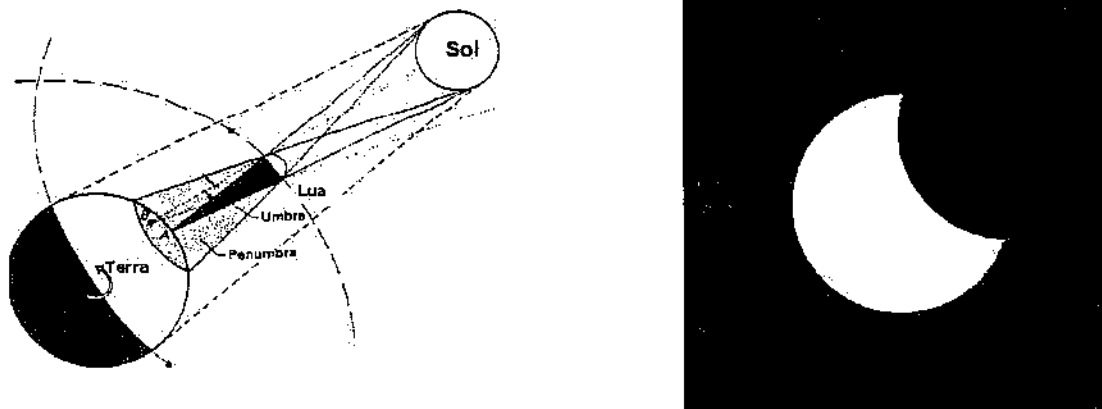


FIGURA 1.20 - ILUSTRAÇÃO DE UM ECLIPSE TOTAL DO SOL (FORA DE ESCALA) COM FOTOGRAFIA FEITA A PARTIR DO PONTO B DONDE É AVISTADO COMO PARCIAL (FOTO DE ANDRÉ MILONE, NO OBSERVATÓRIO DO VALONGO/UFRJ, RIO DE JANEIRO, 1987).

1.7.3 DURAÇÃO E PERIODICIDADE DOS ECLIPSES

A extensão média do cone da sombra terrestre é 1.400.000 km. O diâmetro desse cone na distância média da Lua é cerca de 9.000 km. A duração máxima da etapa umbral de um eclipse lunar é de 3 h e 20 min. A duração da observação de um eclipse da Lua depende do intervalo tempo que a Lua (cheia) fica acima do horizonte na noite do mesmo.

A duração da etapa umbral de um eclipse do Sol (totalidade), a partir de um único ponto terrestre, é de poucos minutos. Já a duração completa de um eclipse solar, incluindo as etapas penumbral (parcialidade) e umbral, fica por volta de 2 h.

Alguém poderia questionar: - Por que não há eclipses da Lua e do Sol em todos os meses, já que os eclipses lunares ocorrem na fase cheia da Lua e os solares na fase nova? A resposta é que os planos das órbitas da Terra (em torno do Sol) e da Lua (em volta da Terra) não são os mesmos. Se as trajetórias da Lua e da Terra ficassem num mesmo plano, todo mês haveria eclipses do Sol e da Lua. O eixo do cone da sombra terrestre situa-se no plano orbital da Terra. A inclinação entre o plano da órbita lunar e o plano da eclíptica é de aproximadamente $5^{\circ},2$ (veja Figura 1.16). Esse ângulo é pequeno mas não pode ser desprezado. Na distância em que a Lua se encontra, ela freqüentemente está fora do plano da órbita da Terra. Os eclipses só acontecem quando a trajetória da Lua atravessa a eclíptica quando da ocasião das fases nova ou cheia.

Ocorrem no mínimo 2 eclipses por ano (que são solares) e, no máximo, 7 eclipses por ano: 2 lunares e 5 solares, ou 3 lunares e 4 solares. A cada 18 anos aproximadamente, todos os eclipses acontecem com a mesma regularidade. Esse intervalo de tempo é denominado de Período de Saros, quando ocorrem 41 eclipses do Sol e 29 eclipses da Lua.

Embora os eclipses lunares sejam menos freqüentes em número, a visualização desse tipo de eclipse a partir de qualquer ponto da Terra é facilitada em função de que basta ter a Lua acima do horizonte para podermos observá-lo (além de um céu sem nuvens obviamente). A observação dos eclipses solares é apresentada na subseção anterior.

1.8 MARÉS DOS OCEANOS

Os pescadores que vivem no litoral conhecem muito bem a regularidade da subida e descida do nível do mar, as quais estão associadas à fase da Lua e ao período do dia. Os pescadores mais artesanais adaptam-se a essa variação do nível do mar. Em determinadas regiões da Terra, como no litoral do Norte e Nordeste do Brasil, é surpreendente a diferença entre o avanço e o recuo marítimos.

1.8.1 INTERAÇÕES SOL-TERRA-LUA

Além da iluminação pelo Sol que fornece energia para sustentar a vida, a Terra sofre a influência gravitacional dessa estrela. Se a Terra hipoteticamente parasse de se movimentar ao redor do Sol, ela seria atraída pela gravidade do mesmo, indo ao seu encontro.

Os movimentos de translação da Terra e da Lua podem ser tratados como movimentos de massas pontuais. Contudo, a Terra e a Lua são corpos de dimensões não-desprezíveis. Além do mais, eles não são rígidos como se poderia supor.

A força gravitacional do Sol ao ponto mais próximo da Terra é maior do que a força do lado diametralmente oposto da superfície; a diferença na distância desses dois pontos é igual, no máximo, ao diâmetro equatorial do planeta. Ocorre, então, o fenômeno denominado de efeito de maré. O mesmo pode-se ser dito para interação entre a Lua e a Terra. Tanto a crosta terrestre como a lunar sofrem o efeito de maré respectivamente devido à ação da Lua e da Terra. A atmosfera da Terra também sofre o efeito de maré, o qual não será tratado aqui. Não iremos tratar também do efeito de maré sobre a crosta da Terra mais sim sobre sua massa líquida superficial que se comunica entre si. Em função do efeito de maré sobre os oceanos, cujo predomínio é da Lua, o nível do mar eleva-se basicamente na direção do vetor resultante da composição do efeito de maré Lua-Terra (peso 2) e do efeito de maré Sol-Terra (peso 1). Na Figura 1.21, visualiza-se a ocorrência das marés altas na direção Sol-Terra-Lua, em pontos diametralmente opostos quando da ocasião da Lua cheia. As marés baixas ocorrem em pontos da superfície oceânica situados na direção perpendicular àquela direção. Na fase nova da Lua, a situação repete-se.

1.8.2 PERIODICIDADE DAS CHEIAS E VAZANTES

Sem a presença da Lua, os oceanos da Terra sentiriam o efeito de maré apenas devido ao Sol. As cheias, também chamadas de preamar, ocorreriam sempre próximo ao meio-dia (solar) e à meia-noite. As vazantes, ou baixa-mar, seriam às 6h (manhã) e 18h, aproximadamente. Ambas não seriam tão pronunciadas. Portanto, fixando-se um local na Terra a periodicidade das marés seria determinada apenas pela rotação terrestre.

Com a presença da Lua, a situação já é outra. Em virtude da Lua estar cerca de 400 vezes mais próxima do que o Sol, seu efeito de maré sobre a Terra é aproximadamente o dobro do efeito de maré devido ao Sol, mesmo que esse tenha 27 milhões de vezes mais massa do que a Lua. O diâmetro terrestre é cerca de 3% da distância Terra-Lua e, aproximadamente, 0,01% da distância Terra-Sol.

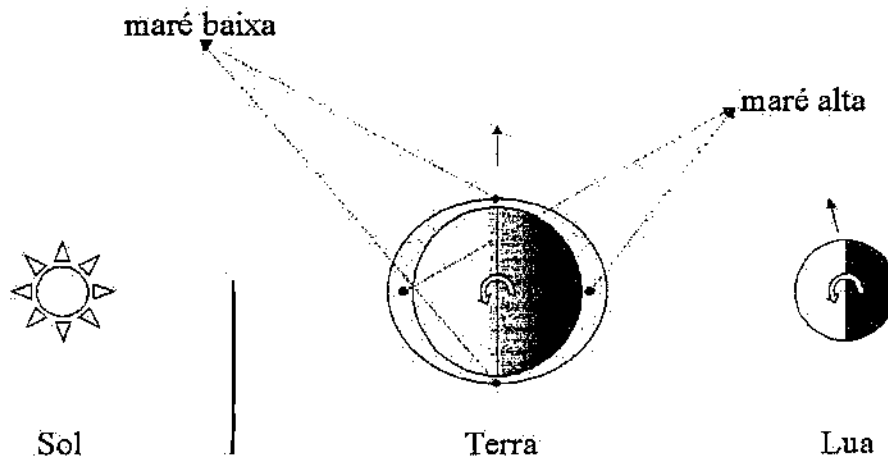


FIGURA 1.21 - ILUSTRAÇÃO DO EFEITO DE MARÉ TOTAL SOBRE OS OCEANOS DA TERRA NA OCASIÃO DA LUA CHEIA (VISÃO DO NORTE DA ECLÍPTICA, FORA DE ESCALA).

A intensidade das marés dos oceanos é dependente em primeira instância da fase lunar. Outros fatores são a configuração litorânea e a profundidade do mar (baía ou lagoa). Quanto menos profunda a plataforma continental, maior é o desnível entre as marés alta e baixa.

Nas fases nova e cheia da Lua, o efeito de maré da Lua é somado diretamente ao do Sol. Nessas ocasiões, as cheias e vazantes dos oceanos são as mais acentuadas de todo ciclo lunar (Figura 1.21). As cheias ocorrem ao meio-dia e à meia-noite aproximadamente. As vazantes acontecem nos instantes intermediários ($\approx 6h$ e $18h$). Quando a Lua está em quarto crescente, as cheias são observadas por volta das 4h (madrugada) e 16h e as

vazantes por volta das 10h e 22h. No quarto minguante, as marés altas ocorrem em torno das 8h e 20h e as baixas por volta das 2h e 14h. Modifique a Figura 1.21 para um entendimento melhor.

Portanto, tem-se uma maré alta a cada 12 horas sempre intercalada de uma maré baixa que também acontece a cada 12 horas. Partindo do máximo de uma vazante (que é bem curto), teremos de modo intermitente um período de 6 horas para a elevação do nível do mar até o máximo da cheia, seguido de um período igual para a diminuição do nível. Em virtude da Lua surgir no céu cerca de 50 minutos mais tarde a cada dia, os horários das cheias e vazantes atrasam-se da mesma maneira.

Como consequência, a subida e descida das marés dos oceanos provocam uma desaceleração da rotação da Terra por atrito entre a massa líquida e o fundo do mar. A velocidade de rotação da Terra está decrescendo de forma lenta e gradual. A cada 10 milhões de anos, o período de rotação terrestre aumenta em aproximadamente 4 minutos.

O QUE É FORÇA GRAVITACIONAL?

A força gravitacional entre dois corpos é sempre atrativa na direção que une seus centros de massa. A força gravitacional exercida pelo primeiro sobre o segundo é igual em intensidade e direção àquela exercida pelo segundo sobre o primeiro, porém atuam em sentidos opostos. A intensidade da força gravitacional, F_{12} , entre dois corpos é diretamente proporcional às massas de cada um, m_1 e m_2 (ou melhor, ao produto das massas) e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os centros de massa de ambos, d . A intensidade da força gravitacional, em módulo, entre dois corpos é expressa a seguir. A constante de proporcionalidade, G , é a constante de gravitação universal (vale $6,67259 \times 10^{-11}$ Newton.m²/kg² no sistema MKS de unidades).

$$F_{12} = G \times (m_1 \times m_2) \div d^2$$

A gravidade, g , é simplesmente a aceleração sofrida por um corpo quando sobre ele é exercida uma força gravitacional externa (ou melhor, quando esse corpo se situa no campo gravitacional de outro). Aceleração de um corpo é a variação de sua velocidade por unidade de tempo. A aceleração gravitacional ocorre na direção que une os centros de massas de ambos corpos e no sentido daquele de maior massa.

1.9 BIBLIOGRAFIA

Boczko, R. Astronomia de Posição. In: 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.

Boczko, R. Sistema solar, In: 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.

Caniato, R. **O céu**: Projeto Brasileiro de Ensino de Física. 3.ed. Campinas: Fundação Tropical de Pesquisas e Tecnologia, 1978. v.1

de Freitas, S. M. **O Universo**: nem aristotélico, nem ptolomaico: curso dado pela Fundação Planetário da Cidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: SMC/ PCRJ, 1997.

Milone, A. **Astronomia**: notas de aulas dadas no Colégio São Vicente de Paulo. Rio de Janeiro, 1997.

Mourão, R. R. de F. **Dicionário enciclopédico de Astronomia e Astronáutica**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1997.

Rival, M. **Os grandes experimentos científicos**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

Vicino, G. **Programa de la asignatura**: curso único de Astronomia. Uruguai, 1991. Material datilografado sem editor.

Vieira, F. **Identificação do céu**: curso dado pela Fundação Planetário da Cidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: SMC/PCRJ, 1996.

Capítulo 2

ASTROFÍSICA OBSERVACIONAL

Francisco José Jablonski^{*}

^{*} e-mail: chico@das.inpe.br

ASTROFÍSICA OBSERVACIONAL

LISTA DE FIGURAS	2-5
2.1 O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	2-7
2.1.1 O QUE QUER DIZER ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO?	2-7
2.1.2 ESPECTRO SONORO (OU ACÚSTICO)	2-8
2.1.3 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	2-9
2.1.4 ESPECTRO DE ONDAS GRAVITACIONAIS	2-13
2.2 A ATMOSFERA DA TERRA E SEUS EFEITOS SOBRE O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	2-14
2.2.1 O MEIO AMBIENTE E O ESPECTRO ACÚSTICO	2-14
2.2.2 A ATMOSFERA DA TERRA E O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	2-15
2.3 DETETORES E TELESCÓPIOS	2-17
2.3.1 DETETORES DE ONDAS SONORAS	2-17
2.3.2 DETETORES E TELESCÓPIOS PARA ONDAS ELETROMAGNÉTICAS	2-18

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - O ESPECTRO DO REI HAMLET.	2-7
FIGURA 2.2 - O ESPECTRO ACÚSTICO DE UM PIANO EM TORNO DA 3ª OITAVA.	2-8
FIGURA 2.3 - AS ONDAS ACÚSTICAS CORRESPONDENTES AO ESPECTRO.	2-9
SONORO DA FIGURA. 2.2.	2-9
FIGURA 2.4 - O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO NA REGIÃO DE FM.	2-10
FIGURA 2.5 - O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.	2-11
FIGURA 2.6 - O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO DE MATERIAIS A DIFERENTES TEMPERATURAS.	2-12
FIGURA 2.7 - A DILUIÇÃO DA ENERGIA DA ONDA COM A DISTÂNCIA À FONTE.	2-14
FIGURA 2.8 - A ATENUAÇÃO DA LUZ DENTRO DA ATMOSFERA TERRESTRE.	2-16
FIGURA 2.9 - AS JANELAS DE OBSERVAÇÃO A PARTIR DO SOLO.	2-17
FIGURA 2.10 - UM DETETOR DE ONDAS ACÚSTICAS.	2-17
FIGURA 2.11 - AUMENTANDO A SENSIBILIDADE DO DETETOR DE ONDAS SONORAS..	2-18
FIGURA 2.13 - UM TELESCÓPIO PARA DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE E DIREÇÃO DA RADIÇÃO DE FONTES CELESTES.	2-21

2.1 O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

2.1.1 O QUE QUER DIZER ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO?

Hamlet é o nome de uma peça muito famosa escrita por William Shakespeare. A cena inicial é impressionante: os guardas de um castelo na Dinamarca vêem o *espectro* do rei Hamlet vagando pelas ameias durante a noite. A explicação para o aparecimento do fantasma fornece o enredo da peça, que contém sete mortes a golpes de espada, envenenamentos e afogamentos, loucuras verdadeiras e simuladas, um adultério, a caveira de um alegre bobo da corte desenterrada no momento oportuno e, é claro, um *espectro* fantasmagórico. No cinema, uma das montagens recentes tem Mel Gibson no papel de Hamlet. A cena inicial mostra o *espectro* do velho rei sob forma fosforescente e transparente.

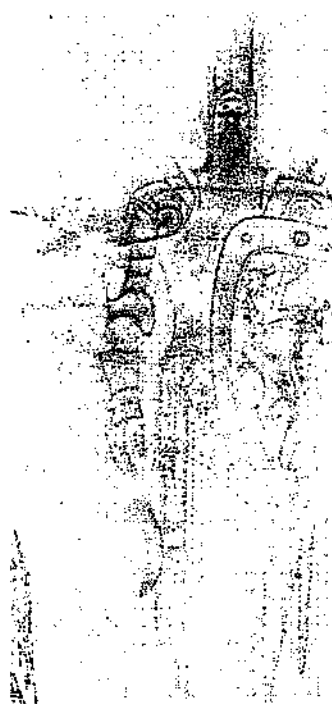


FIGURA 2.1 - O ESPECTRO DO REI HAMLET.

Quando falamos em **espectro eletromagnético**, não estamos falando de fantasmas. Ao contrário, falamos de algo bem concreto. Nas próximas seções você verá o que os dois conceitos têm em comum e, principalmente, no que são distintos.

2.1.2 ESPECTRO SONORO (OU ACÚSTICO)

Quem resiste apertar pelo menos uma tecla estando perto de um piano? Se apertarmos a 29ª tecla da esquerda para a direita (tecla lá, 3ª oitava), o som produzido é uma vibração de 440 ciclos por segundo. Mais tecnicamente, dizemos que a **frequência** da onda sonora correspondente ao lá₃ é 440 Hertz, ou 440 Hz. As outras teclas nesta mesma oitava dão sons de 262 Hz (dó₃), 294 Hz (ré₃), 330 Hz (mi₃), 349 Hz (fá₃), 392 Hz (sol₃), 494 Hz (si). Para obter as frequências das notas nas outras oitavas do piano, é só lembrar que de uma oitava para a oitava seguinte a frequência dobra. Assim, o dó₄ tem 524 Hz de frequência.

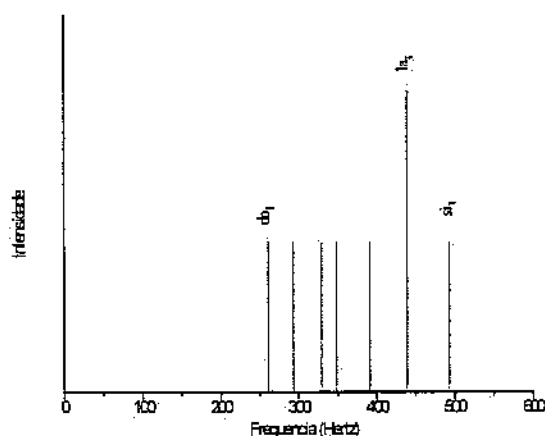


FIGURA 2.2 - O ESPECTRO ACÚSTICO DE UM PIANO EM TORNO DA 3ª OITAVA.

A Figura 2.2 mostra o espectro acústico do piano em torno da 3ª oitava. O eixo horizontal representa as frequências, o eixo vertical, a intensidade do som. Note que se você golpear mais forte uma das teclas, o piano soará mais alto. Isso está representado na figura para a nota lá₃. A Figura 2.3 mostra o que aconteceria se tivéssemos um aparelho capaz de registrar a vibração das cordas do piano em um centésimo de segundo. Note que nesse intervalo de tempo o lá₃ executa $440/100 = 4,4$ oscilações.

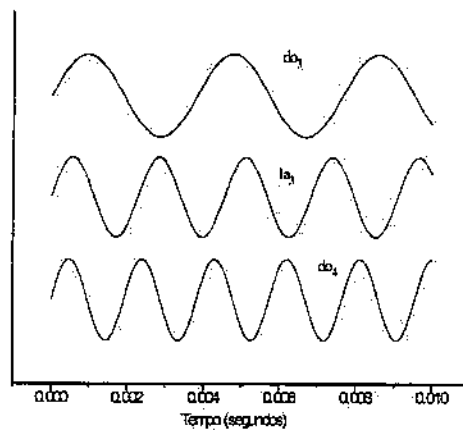


FIGURA 2.3 - AS ONDAS ACÚSTICAS CORRESPONDENTES AO ESPECTRO

SONORO DA FIGURA. 2.2.

Exercício: Tente imaginar como seria o espectro sonoro de uma apresentação ao vivo do Guns'n'Roses.

2.1.3 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Agora fica mais fácil visualizar o que é espectro eletromagnético. É um conceito semelhante ao mostrado nas Figs. 2.2 e 2.3, com a diferença que as vibrações não são mecânicas, como as das cordas do piano, mas vibrações **elétricas e magnéticas**. Quando dizemos que a rádio Tabajara transmite em AM na frequência de 780 quilohertz, estamos dizendo que na antena transmissora dessa rádio, existe corrente elétrica viajando de um lado para outro com frequência de 780 mil ciclos por segundo! Essa vibração produz ondas eletromagnéticas que deixam a antena e se propagam pelo espaço. Um receptor de rádio é capaz de captar essas ondas, de modo análogo ao nosso ouvido, que é capaz de captar o som do piano mesmo que estejamos longe dele.

Na Figura 2.4 é mostrado esquematicamente o espectro eletromagnético na faixa de FM em São José dos Campos. Note que foram deixadas muitas emissoras de fora, querendo expressar um profundo desejo de que não existissem.

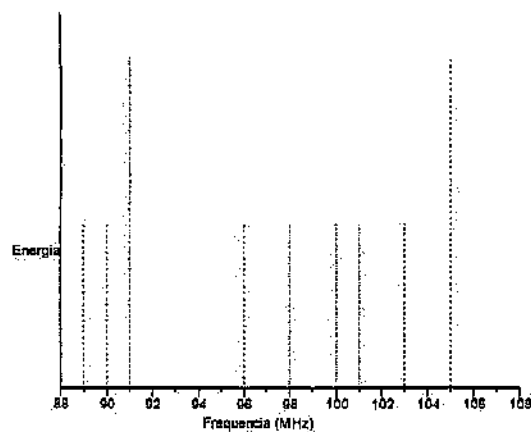


FIGURA 2.4 - O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO NA REGIÃO DE FM (88 A 108 MHz).

Do mesmo modo que para as ondas sonoras, a frequência das ondas eletromagnéticas também varia. E muito. Por volta de 1 milhão de Hertz temos as rádios AM. Entre 88 milhões de Hertz (de forma mais compacta, 88 Megahertz ou 88 MHz) e 108 MHz temos as frequências onde operam as emissoras de FM. Telefones celulares operam em frequências de quase 1 bilhão de Hertz (1 Gigahertz ou 1 GHz). A Figura 2.5 identifica outras formas de radiação eletromagnética. Note que nessa figura foi usada uma forma compacta de expressar os números enormes que aparecem quando falamos da frequência das ondas eletromagnéticas. A lógica é simples, veja: $1000 \text{ Hz} = 10^3 \text{ Hz}$, $10000 \text{ Hz} (10 \text{ kHz}) = 10^4 \text{ Hz}$, $1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$, $1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$. A luz que nos ilumina tem frequência entre 10^{14} e 10^{15} Hz .

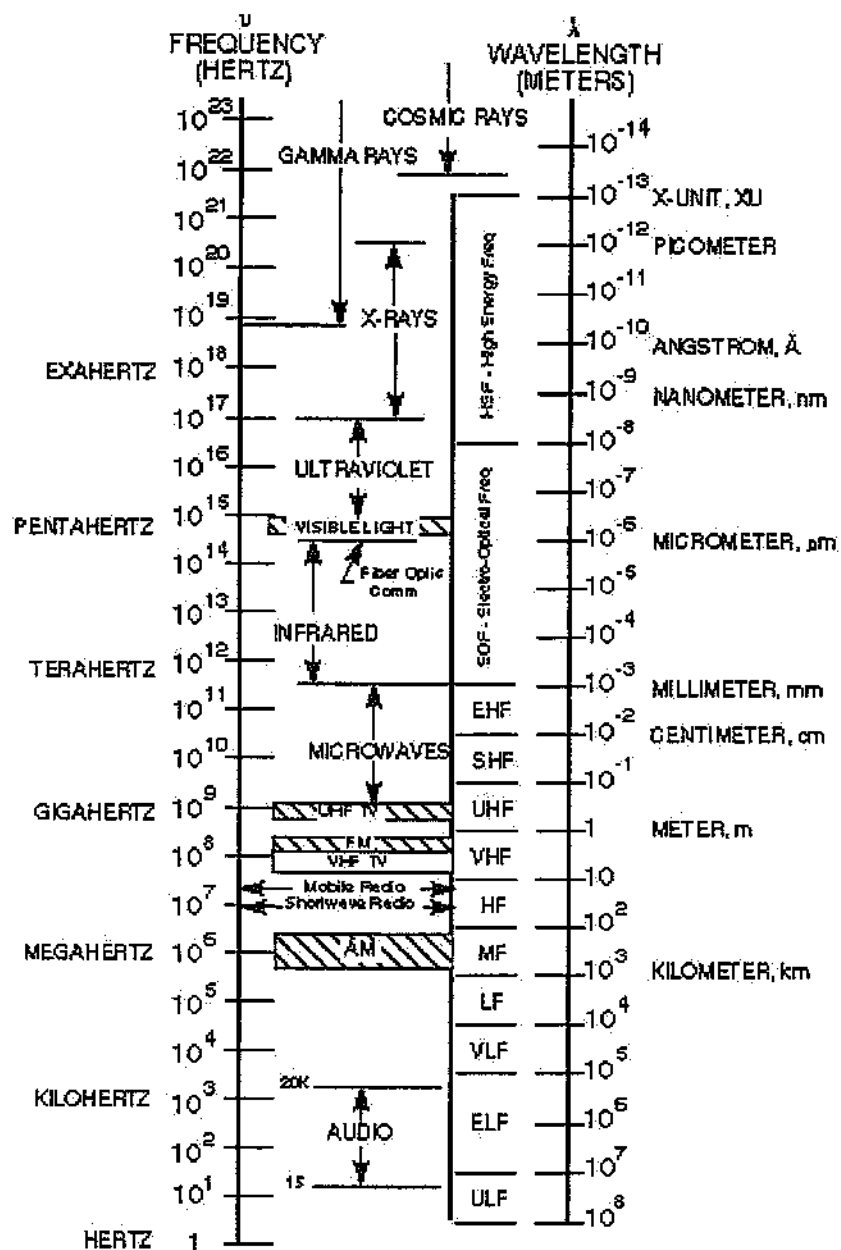


FIGURA 2.5 - O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.

O espectro emitido por uma fonte de radiação eletromagnética não precisa ser confinado a frequências bem definidas, como mostrado na Figura 2.4. A maioria dos objetos no céu emite em faixas amplas de frequência. Tecnicamente isso se chama de espectro "contínuo". A analogia com o piano seria a seguinte: essas fontes se comportam como se fossem um piano eletromagnético de um número enorme de teclas, todas elas sendo tocadas ao mesmo tempo.

A Figura 2.6 mostra uma boa aproximação ao que é o espectro eletromagnético das estrelas: quanto maior é a temperatura mais energia é emitida por unidade de área e mais deslocado para o azul é o máximo do espectro. Os espectros reais diferem dos espectros mostrados na Fig. 2.6 pela presença de absorções e emissões localizadas devido aos elementos químicos que compõem as estrelas.

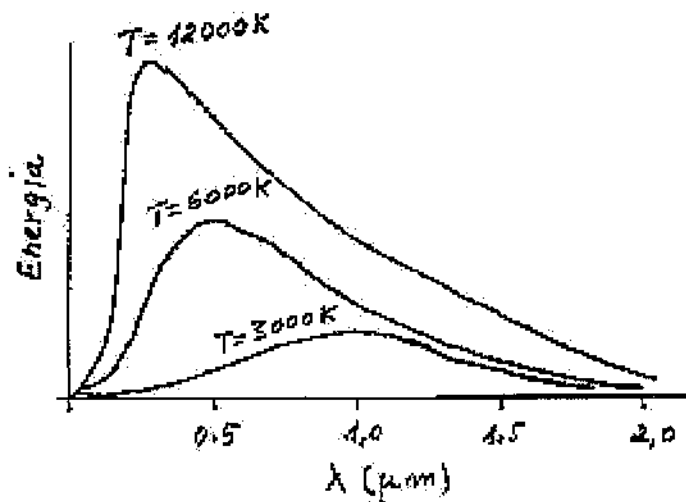


FIGURA 2.6 - O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO DE MATERIAIS A DIFERENTES TEMPERATURAS.

Para quem gosta de saber coisas mais avançadas, aqui vão duas fórmulas que são muito usadas em Física, Engenharia e Astronomia:

1) Relação entre a distância entre uma vibração e outra (comprimento) da onda eletromagnética e a frequência:

$$\text{comprimento de onda (metros)} = \text{velocidade da luz (m/s)} / \text{frequência (Hz)}$$

Numa forma mais compacta, usando símbolos matemáticos, podemos escrever:

$$\lambda = c / \nu \quad (2.1)$$

Exemplo: O que meu pai queria dizer quando dizia que ouvia a Rádio Gaúcha na faixa de 49 metros?

Resposta: Estava querendo dizer que essa rádio, transmitindo em 6 MHz, emite ondas eletromagnéticas cujos picos de intensidade são afastados uns dos outros por uma distância igual a

$$\text{comprimento de onda} = 300.000.000 / 6.000.000 = 49 \text{ m}$$

A fórmula acima contém uma informação muito importante: toda onda eletromagnética se propaga à velocidade da luz, ou seja, 300.000 km/s, ou 3×10^8 m/s.

2) Energia das ondas eletromagnéticas

Uma das grandes descobertas da Física é a de que podemos entender as ondas eletromagnéticas como “pedacinhos” de onda (pacotes de onda) cada um carregando uma certa quantidade de energia:

$$\text{Energia (Joule)} = 6.6 \times 10^{-34} \times \text{frequência (Hz)}$$

ou, em forma matemática,

$$E = h \nu \quad (2.2)$$

sendo h o símbolo para a **constante de Planck**.

Exemplo: A Rádio Bandeirantes irradia 660 kW de energia em ondas eletromagnéticas na frequência de 1 MHz. Quantos “pacotinhos” de radiação eletromagnética isso dá por segundo?

Resposta: 660 kW é o mesmo que 660.000 Joule/segundo. Então o número de pacotes é

$$660.000 / (6.6 \times 10^{-34} \times 10^6) = 10^{33} \text{ pacotes !!!}$$

2.1.4 ESPECTRO DE ONDAS GRAVITACIONAIS

Existe um outro tipo de onda na natureza que é diferente das ondas sonoras e das ondas eletromagnéticas. São as **ondas gravitacionais**. Elas também se propagam com a velocidade da luz, mas em vez de serem produzidas por cargas elétricas em movimento, são produzidas por **massas em movimento**. Essas ondas ainda não foram detectadas diretamente, mas isso deverá acontecer no próximo século. Uma fonte importante de

ondas gravitacionais são os sistemas binários do tipo Terra-Lua ou estrela-estrela. Pode-se dizer que a nossa Galáxia é um imenso piano com alguns bilhões de teclas, cada uma delas constantemente apertadas produzindo ondas gravitacionais cuja frequência é proporcional à frequência com que a binária gira. O estudo do espectro das ondas gravitacionais é um dos desafios para os astrofísicos do século 21.

2.2 A ATMOSFERA DA TERRA E SEUS EFEITOS SOBRE O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

2.2.1 O MEIO AMBIENTE E O ESPECTRO ACÚSTICO

Os moradores da Vila São Benedito que tentaram ouvir as músicas cantadas por Chitãozinho e Xororó durante o Vale Rodeio perceberam que a intensidade do som diminui muito à medida que o observador se afasta da fonte sonora. É muito difícil ouvir um piano a um quilômetro de distância, por mais quieto que seja o ambiente. A razão é explicada na Fig. 2.7, em que uma pedra é jogada num lago e um barquinho, colocado à diferentes distâncias, é chacoalhado pela onda que se propaga. Note que quando o barco está distante, a fração do círculo interceptado pelo barco diminui. De modo geral, a energia recebida por um detector de ondas **diminui com a distância à fonte**. Se a fonte emite em **todas as direções no espaço**, a energia **diminui com o quadrado da distância à fonte**.

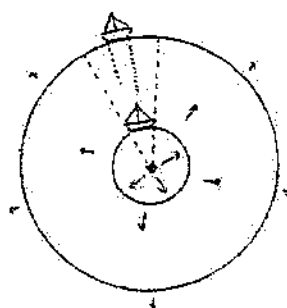


FIGURA 2.7 - A DILUIÇÃO DA ENERGIA DA ONDA COM A DISTÂNCIA À FONTE.

O observador perspicaz percebe também que certas frequências sonoras são mais atenuadas que outras. Isso quer dizer que devem existir outros fatores que produzem

diminuição da intensidade das ondas. Um deles é a **absorção**. Um exemplo de absorção entre o observador e a fonte de ondas sonoras é uma parede. No caso de edifícios de apartamentos, nem sempre a absorção suprime completamente o som.

2.2.2 A ATMOSFERA DA TERRA E O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

As ondas eletromagnéticas sofrem efeitos parecidos com os descritos para as ondas sonoras. Para começar, a quantidade de energia que chega até nós cai com o quadrado da distância. Veja Alfa Centauri, por exemplo. É uma estrela mais ou menos como o Sol, mas pelo fato de estar a 4,3 anos luz de distância, a quantidade de energia que chega até nós é

$$(\text{distância [Alfa Centauri]}/\text{distância [Sol]})^2 = (4 \times 10^{16} \text{ m}/1,5 \times 10^{11} \text{ m})^2 = 7 \times 10^{10}$$

ou seja, 70 bilhões de vezes menor que a recebida de nosso Sol.

A radiação eletromagnética também é absorvida pela atmosfera. No caso da luz, isso é bem fácil de ver com o seguinte exemplo. Ao meio-dia, não conseguimos olhar para o Sol (mesmo que conseguíssemos, não seria saudável fazê-lo). Mas ao por-do-Sol, é muito fácil fazê-lo. É que ao entardecer a luz tem que atravessar um caminho muito mais longo dentro da atmosfera e sofre maior atenuação. Veja esquematicamente na Figura 2.8 como isso acontece. A luz também sofre atenuação diferente em frequências diferentes. A luz vermelha é menos atenuada que a luz azul, de modo que vemos o Sol avermelhado ao entardecer porque só a luz vermelha chega até nós. O principal processo físico em jogo nesse caso é o **espalhamento**, que explica também a cor azul do céu sem nuvens. A luz pode ser atenuada também por **absorção pura** em raias atômicas ou bandas moleculares. Nesse caso, as frequências envolvidas são muito bem definidas e representam uma espécie de “impressão digital” do átomo ou molécula que a produziu.

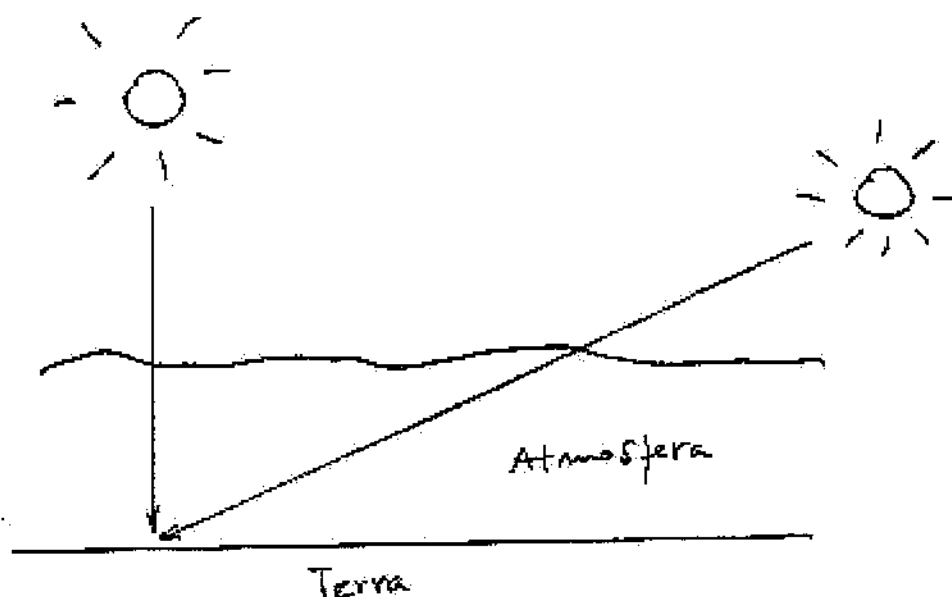


FIGURA 2.8 - A ATENUAÇÃO DA LUZ DENTRO DA ATMOSFERA TERRESTRE.

Algumas moléculas na nossa atmosfera absorvem quase toda a radiação que chega de fora em certas faixas de frequência, de modo que muito pouco chega até o chão. Isso tem importância vital para os seres que povoam a Terra. A molécula composta por três átomos de Oxigênio (chamada Ozônio) bloqueia a luz ultravioleta que em excesso, é mortal aos seres vivos (os dentistas usam lâmpadas ultravioleta para desinfetar suas ferramentas de trabalho). Há uma grande preocupação hoje em dia com os efeitos da destruição da barreira protetora de Ozônio que envolve a Terra, em virtude de reações químicas com produtos produzidos pelo homem.

Se por um lado estamos vivos porque a atmosfera da Terra nos protege das radiações nocivas, por outro, a própria atmosfera impede que observemos do solo certas frequências do espectro eletromagnético, emitidas pelos corpos celestes. Isto ocorre no ultravioleta, raios X, raios-gama, infravermelho e rádio. A Figura 2.9 mostra as “janelas” no espectro eletromagnético pelas quais podemos observar o Universo a partir de observatórios no chão. Para observar a radiação eletromagnética nas regiões absorvidas pela atmosfera a única solução é colocar o “observador” fora dela! Essa é uma das razões pelas quais o Telescópio Espacial Hubble foi colocado em órbita. O

INPE opera um centro de lançamento de balões que consegue levar instrumentos a mais de 40 km de altura, deixando para trás 99% da atmosfera.

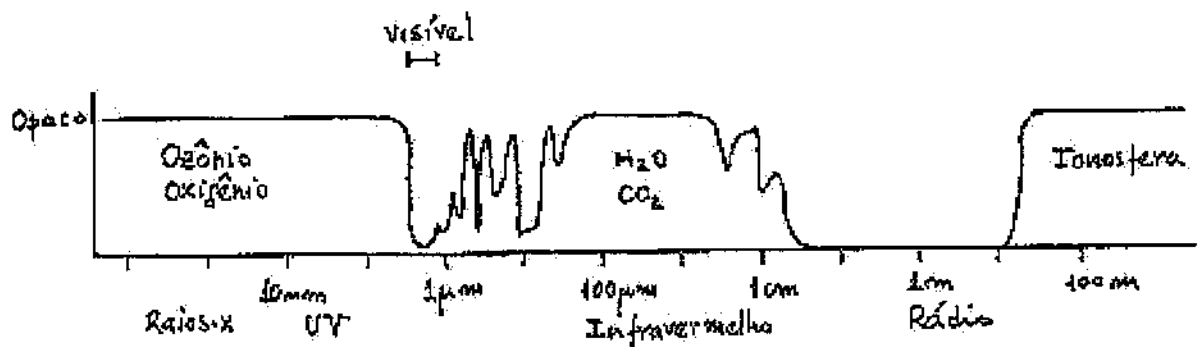


FIGURA 2.9 - AS JANELAS DE OBSERVAÇÃO A PARTIR DO SOLO.

2.3 DETETORES E TELESCÓPIOS

2.3.1 DETETORES DE ONDAS SONORAS

A Figura 2.10 mostra um detetor de ondas sonoras, o ouvido. Note que a orelha não tem um papel significativo na detecção dos sons. É o ouvido, em particular o tímpano, que tem essa função. O tímpano é uma espécie de membrana, como a membrana de um tambor, que vibra quando atingida pelas compressões de ar produzidas por ondas sonoras.

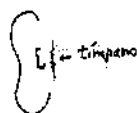


FIGURA 2.10 - UM DETETOR DE ONDAS ACÚSTICAS.

A vibração do tímpano é processada pelo nosso cérebro que analisa o espectro de frequências. Combinando os sinais de dois detetores (um ouvido de cada lado da

cabeça) o cérebro é capaz de saber a orientação da fonte de sons. Caso o detetor perca a *sensibilidade*, como ocorreu com o meu avô à medida que foi envelhecendo, é possível realizar uma compensação como a mostrada na Figura 2.11 (a). O objetivo desse aparelho é aumentar a área coletora de ondas acústicas. Uma outra solução para o mesmo problema é mostrada na Fig. 2.11 (b): em vez de aumentar a área coletora, o sinal recebido é *amplificado* por um circuito eletrônico.

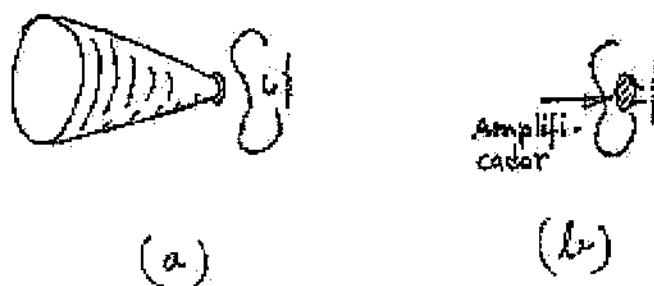


FIGURA 2.11 - AUMENTANDO A SENSIBILIDADE DO DETETOR DE ONDAS SONORAS.

Embora o ouvido humano seja um detetor magnífico, ele é superado por detetores como os microfones que podem registrar sons de frequências mais altas e mais baixas que as que conseguimos ouvir. Podem registrar também intensidades sonoras maiores e menores do que as que conseguimos captar com o ouvido.

2.3.2 DETETORES E TELESCÓPIOS PARA ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

O detetor mais aprimorado que possuímos é o olho. A combinação olho+cérebro faz simultaneamente uma análise do espectro da luz e sua distribuição espacial e de intensidade. O olho produz imagens. O princípio de detecção é baseado em células especializadas que enviam sinais elétricos ao cérebro quando são atingidas por luz.

Como vimos antes, o espectro eletromagnético cobre uma vasta faixa de frequências. O princípio de detecção pode ser diferente para diferentes frequências. Nos detetores de ondas de rádio, por exemplo, o que se mede é o deslocamento de cargas elétricas num

condutor, na presença da onda eletromagnética. Esse condutor se chama antena e pode ter formas variadas, mas o objetivo é sempre o mesmo, oferecer uma área exposta à onda eletromagnética. Quanto maior a área da antena, mais energia eletromagnética pode ser captada. O INPE opera um rádioobservatório que possui uma antena parabólica de 13 metros de diâmetro capaz de observar ondas de rádio em frequências de dezenas de gigahertz.

Nas frequências correspondentes à luz visível, os detectores são capazes de registrar os pacotes individuais de energia associados às ondas eletromagnéticas. Esses pacotes são chamados de **fótons**. O detector que existe dentro de uma câmara de videocassete tem semelhança com o detector no nosso olho, ou seja, é capaz de registrar e discriminar luz de frequências diferentes, e pelo fato de ser dividido em muitas células básicas, pode fornecer informação da direção da fonte emissora de luz.

Mas, para que então precisamos de telescópios? Não bastaria o detector sozinho para registrar a intensidade, frequência e direção da radiação eletromagnética? A resposta está relacionada com o exemplo da Fig. 2.11 (a). Em Astronomia é quase a regra estarmos na situação do surdo -- não por falta de sensibilidade do detector, uma vez que os mais elaborados sistemas de amplificação (Fig. 2.11b) são utilizados -- mas porque as fontes celestes de radiação são extremamente fracas. A única maneira de remediar é aumentar a área coletora de radiação. Esses aparelhos se chamam genericamente de **telescópios** ou **antenas**, conforme a faixa do espectro que estiver sendo estudada. Na Divisão de Astrofísica do INPE existem pesquisas em andamento utilizando telescópios para ondas de rádio, para luz visível, para raios X e até mesmo para ondas gravitacionais!

A Figura 2.12 ilustra os problemas que encontramos quando tentamos determinar a intensidade, e direção da radiação eletromagnética com um mesmo instrumento.

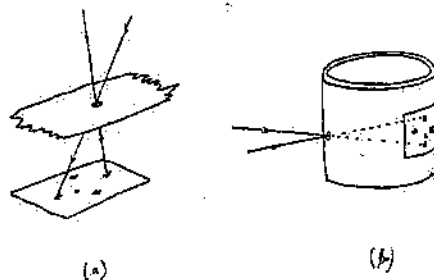


FIGURA 2.12 - DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE E DIREÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA.

A Fig. 2.12 (a) mostra o “telescópio” mais simples que pode ser construído. Ele funciona tanto para ondas de rádio quanto para luz, raios X ou raios gama. O único requisito é que as dimensões da abertura sejam bem maiores que o comprimento de onda da radiação. Esse tipo de montagem já teve muita popularidade em um contexto não científico. Antes do advento da fotografia as “câmaras obscuras” eram utilizadas para projetar imagens em vidros despolidos (foscos) e servir de guia para o artista na pintura de panoramas. Quanto menor for a razão entre o tamanho da abertura e a distância ao detector, mais detalhe o instrumento é capaz de discernir. A maior desvantagem desse tipo de “telescópio” é que a área coletora é muito pequena. A Fig. 2.12 (b) mostra como você pode montar uma câmara escura para demonstração em sala de aula. Lembre que para esse tipo de aparelho funcionar bem é importante que a tela semitransparente receba o mínimo possível de luz externa. Na Divisão de Astrofísica do INPE está sendo construído um telescópio de raios X que utiliza o princípio de funcionamento da câmara escura. Para melhorar sua capacidade de captar energia o anteparo de entrada contém uma grande quantidade de furos e as imagens completamente embaralhadas que são projetadas na tela de saída são separadas através de um programa no computador.

Galileo Galilei foi o responsável pela divulgação de uma invenção que resolveu os problemas de registrar a direção de chegada da luz e ao mesmo tempo, captar o máximo de luz possível. Trata-se do uso de uma *lente*. A lente é capaz de ter uma área coletora muito maior que a da abertura circular mostrada na Fig. 2.12, mantendo a capacidade de

separar raios vindos de direções diferentes. Nas lojas de “1,99” você pode comprar uma lupa de plástico que permite fabricar o telescópio mostrado na Figura 2.13.

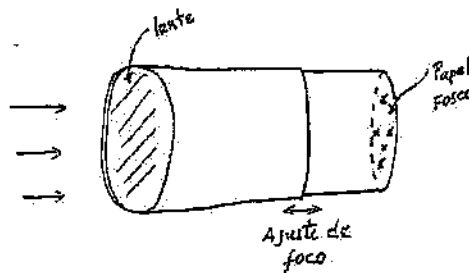


FIGURA 2.13 - UM TELESCÓPIO PARA DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE E DIREÇÃO DA RADIAÇÃO DE FONTES CELESTES.

Para determinar o comprimento do canudo que compõe a parte externa do telescópio, meça primeiro a distância da lente em que uma fonte de luz (lâmpada dentro de casa) forma uma imagem bem definida. Se você utilizar dois canudos, um podendo se deslocar com relação ao outro, pode focalizar precisamente seu instrumento. Se em vez do papel semitransparente você tivesse um filme fotográfico na parte posterior do dispositivo, o aparelho se chamaria “câmara fotográfica”.

O telescópio de 1,6 m de diâmetro no Laboratório Nacional de Astrofísica, em Brazópolis, MG, funciona exatamente segundo o mesmo princípio, apenas que em vez de uma lente para focalizar a luz, possui espelhos. Os espelhos são vantajosos porque não absorvem luz como as lentes, e podem ser construídos com dimensões muito grandes. O Brasil é sócio, com uma fração de 2,5% do capital, de dois telescópios de 8 metros de diâmetro cada um. Trata-se do Projeto Gemini que envolve os Estados Unidos, Inglaterra, Chile, Argentina e Brasil. Um dos telescópios funcionará nos Andes chilenos e o outro numa montanha de 4200 m de altitude, no Havai.

Exercício: Quantas vezes mais luz um telescópio do Projeto Gemini é capaz de captar com relação ao telescópio instalado em Brazópolis?

Resposta: A capacidade de captar radiação é proporcional à área. A área de um círculo é igual a $0,787 \times (\text{diâmetro})^2$. Então,

$$\text{Gemini} / \text{Brazópolis} = 0,787 \times 8^2 / (0,787 \times 1,6^2) = 25 \text{ vezes mais luz.}$$

Capítulo 3

O SISTEMA SOLAR

Cláudia Vilega Rodrigues*

* e-mail: claudia@das.inpe.br

O SISTEMA SOLAR

LISTA DE FIGURAS.....	3-5
LISTA DE TABELAS	3-7
3.1 INTRODUÇÃO.....	3-9
3.2 A EVOLUÇÃO DO CONHECIMENTO SOBRE O SISTEMA SOLAR	3-9
3.3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA SOLAR	3-12
3.3.1 O SOL.....	3-13
3.3.2 OS PLANETAS E SEUS SATÉLITES	3-22
3.3.3 OS COMETAS.....	3-37
3.3.4 OS ASTERÓIDES	3-38
3.3.5 OS METEOROS E METEORITOS	3-39
3.4 A DINÂMICA DO SISTEMA SOLAR.....	3-40
3.4.1 AS LEIS DE KEPLER	3-40
3.4.2 A LEI DE TITIUS-BODE	3-40
3.5 A FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR.....	3-41
3.6 EXISTEM OUTROS SISTEMAS PLANETÁRIOS NO UNIVERSO?.....	3-45
3.7 BIBLIOGRAFIA.....	3-46

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 - O MODELO GEOCÊNTRICO.....	3-10
FIGURA 3.2 - O MODELO HELIOCÊNTRICO	3-12
FIGURA 3.3 - O SOL	3-14
FIGURA 3.4 - ESTRUTURA INTERNA DO SOL, APRESENTANDO O NÚCLEO ONDE OCORREM AS REAÇÕES NUCLEARES E AS ZONAS RADIATIVA E CONVECTIVA.....	3-15
FIGURA 3.5 - GRUPO DE MANCHAS SOLARES	3-18
FIGURA 3.6 - PROEMINÊNCIA ERUPTIVA DE GRANDES DIMENSÕES OBSERVADA NO LIMBO SOLAR.....	3-19
FIGURA 3.7 - “FLARE” OU FLUGURAÇÃO SOLAR	3-21
FIGURA 3.8 - O PLANETA MERCÚRIO.....	3-25
FIGURA 3.9 - O PLANETA VÊNUS.....	3-27
FIGURA 3.10 - O PLANETA TERRA.....	3-29
FIGURA 3.11 - A LUA	3-31
FIGURA 3.12 - O PLANETA MARTE.....	3-32
FIGURA 3.13 - O PLANETA JÚPITER E SEU SATÉLITE IO	3-33
FIGURA 3.14 - O PLANETA SATURNO	3-34
FIGURA 3.15 - O PLANETA URANO COM SEU DISCO E SATÉLITES	3-35
FIGURA 3.16 - OS DOIS HEMISFÉRIOS DO PLANETA NETUNO.....	3-36

FIGURA 3.17 - O PLANETA PLUTÃO E SEU SATÉLITE CARONTE.....	3-37
FIGURA 3.18 - O COMETA HALE-BOPP	3-37
FIGURA 3.19 - UM EXEMPLO DE ÓRBITA DE COMETA.....	3-38
FIGURA 3.20 - UM METEORITO.....	3-39
FIGURA 3.21 - UM DISCO PLANETÁRIO OBSERVADO NA REGIÃO DE ÓRION.....	3-44

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - ALGUNS DADOS SOLARES.....	3-16
TABELA 3.2 - ALGUNS DADOS ORBITAIS DOS PLANETAS.....	3-23
TABELA 3.3 - ALGUNS DADOS FÍSICOS DOS PLANETAS.....	3-24
TABELA 3.4 - ALGUNS DADOS DA TERRA E DA LUA.....	3-30

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo vamos entender melhor o sistema solar. Ele é formado pelo Sol, planetas (entre eles a Terra), outros corpos menores (entre eles cometas e asteróides), além do meio interplanetário. O que são esses astros? No que eles se diferenciam? Quais são seus tamanhos? Como se movimentam? Do que são formados? Qual sua origem?

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

O Sol e outros astros do sistema solar estão muito presentes em nosso cotidiano. A maneira como medimos o tempo, a nossa percepção visual e a nossa própria existência estão muito 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. 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.

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, desde o princípio a observação do céu noturno mostrou ao Homem que alguns objetos se movimentam contra um fundo de "estrelas fixas". Esses objetos, os chamados astros errantes (que é o significado original da palavra planeta), são a Lua, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno. Hoje o significado da palavra planeta é diferente, e não mais chamamos a Lua de planeta. Por que esses objetos eram diferentes?

Muito se pensou sobre 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). Foi sistematizado por Ptolomeu 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 do modelo geocêntrico. As estrelas fixas ficavam todas a uma mesma distância, maior do que a do último planeta conhecido, Saturno. Para explicar corretamente os movimentos observados dos planetas, o modelo geocêntrico necessitava de uma série de complicações geométricas, que não vamos detalhar neste texto.

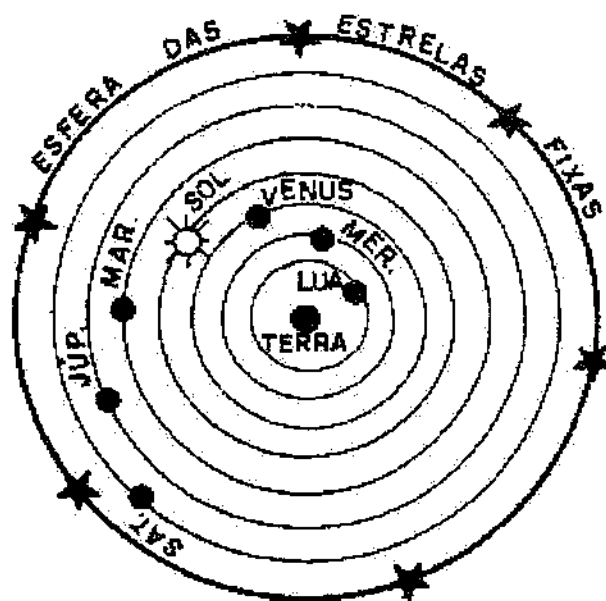


FIGURA 3.1 - O MODELO GEOCÊNTRICO.

Com o objetivo de explicar com mais simplicidade o movimento dos planetas, o astrônomo polonês Nicolau Copérnico propôs, em 1543, o modelo heliocêntrico.

(Hélio, em grego, significa Sol). Como o próprio nome diz, o Sol ficava 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 (280 a.C.) e Nicolas de Cusa (1401-1464), porém, sem maiores repercussões. Galileu, 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.

O modelo de Copérnico, porém, ainda não era o correto. 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 Kepler, no início do século XVII, quem mostrou que as órbitas planetárias eram elípticas. Para isso, ele contou com as suas próprias observações e com as de Tycho Brahe, as mais precisas da época. Veremos mais adiante neste capítulo que Kepler propôs três leis que descrevem corretamente os movimentos dos planetas. 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 de Newton, em 1687, que isso foi respondido. A partir daí, estava aberto o caminho para o desenvolvimento da astronomia moderna.

A teoria da gravitação mostra que um corpo cria um campo gravitacional em torno de si, isto é, um outro corpo sente uma força de atração. Na verdade, ambos são atraídos um pelo outro (veja quadro no Capítulo 1). 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.

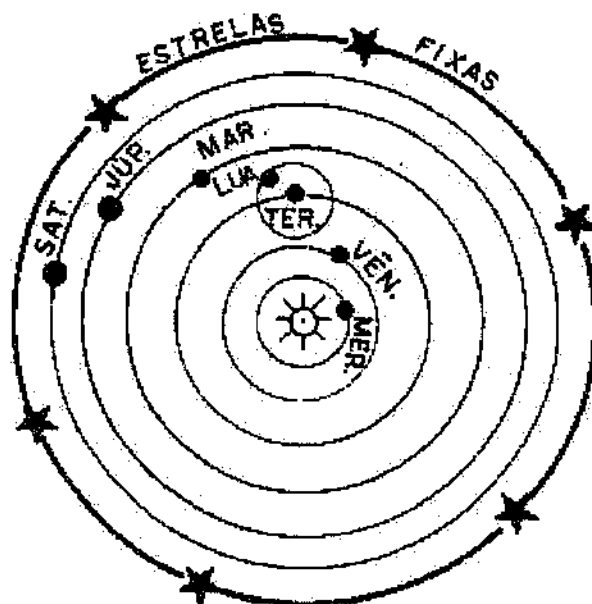


FIGURA 3.2 - O MODELO HELIOCÊNTRICO.

3.3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA SOLAR

O sistema solar inclui o Sol e os planetas, mas abrange bem mais do que isso. No Universo, a distribuição e hierarquia dos objetos é regida 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 mantém reunidos vários corpos (planetas, asteróides, cometas, etc.). Assim, poderíamos definir o sistema solar como o conjunto de todos os corpos (ou matéria) cujo principal centro de atração é o Sol.

A maior parte da massa do sistema solar está concentrada no Sol (99,86%!!!). Os planetas 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. A rotação de Vênus, Urano e Plutão 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 estão aproximadamente em um mesmo plano, que é o mesmo do equador do Sol; 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 explicam 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 objetos 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 Hélios pelos gregos, Mitras pelos persas e Rá pelos egípcios, para citar algumas culturas. Cinco séculos antes da era Cristã, Anaxágoras sugeriu que o Sol fosse uma bola de fogo, o que guarda uma pálida semelhança com a realidade.

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 4 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.

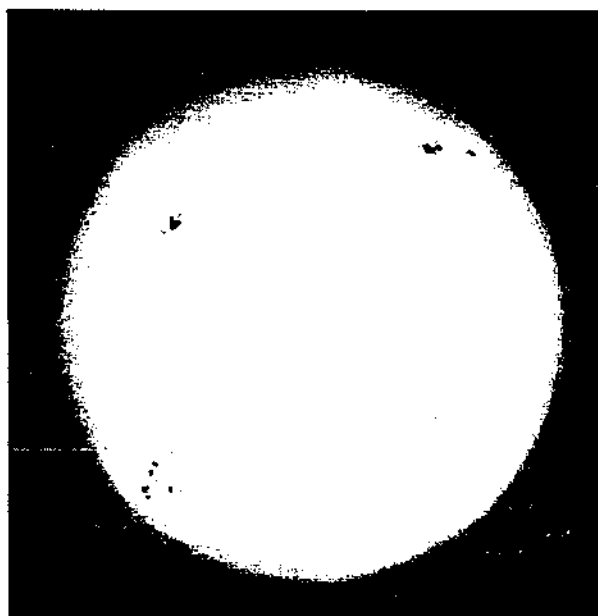


FIGURA 3.3 - O SOL.

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 4.

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.

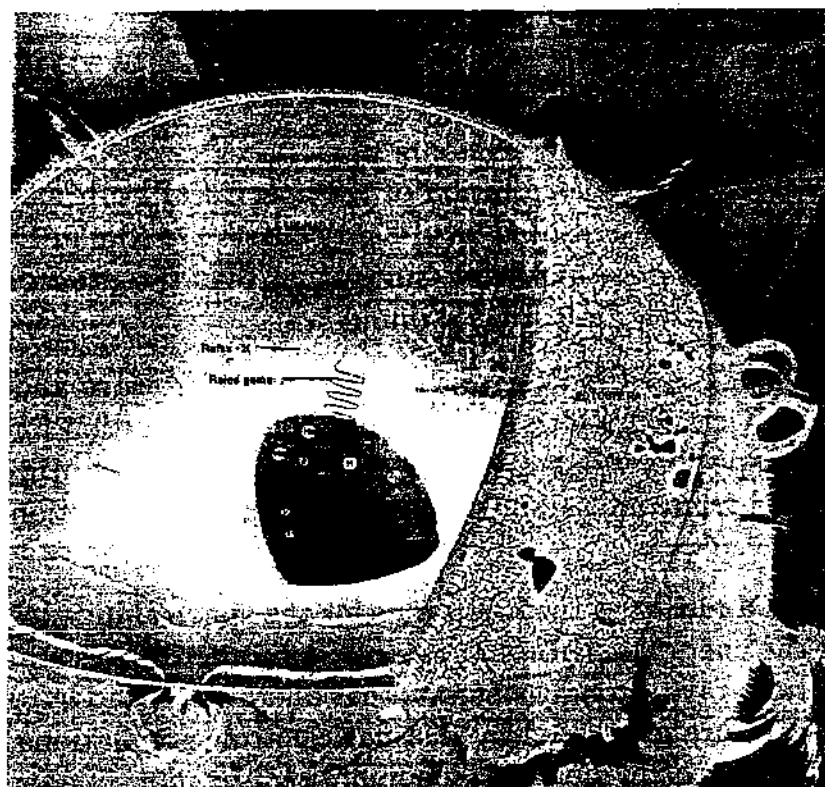


FIGURA 3.4 - ESTRUTURA INTERNA DO SOL, APRESENTANDO O NÚCLEO ONDE OCORREM AS REAÇÕES NUCLEARES E AS ZONAS RADIATIVA E CONVECTIVA.

TABELA 3.1 - ALGUNS DADOS SOLARES.

Massa	332 950 massas terrestres
Raio médio	109,2 raios terrestres
Densidade média	1,41 gramas por centímetro cúbico
Densidade central	162 gramas por centímetro cúbico
Período de rotação	609 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 pelos cientistas de 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, chamada 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.

A parte externa do Sol é composta basicamente por três camadas: (1) a fotosfera, visível a olho nu; (2) a cromosfera, que fica logo acima da fotosfera, e (3) a coroa solar, a camada mais externa e tênue.

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 da Terra 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. Algumas de suas estruturas são apresentadas a seguir.

3.3.1.1 A FOTOSFERA

Nós estamos acostumados a entender um gás como transparente. Porém, o Sol está muito longe disso. Embora seja gasoso, só conseguimos enxergar uma camada externa relativamente fina, a qual chamamos fotosfera. Ela possui uma espessura da ordem de 400 quilômetros, que equivale aproximadamente a meio milésimo do raio solar. É da fotosfera que vem a maior parte da luz visível. Aliás, fotosfera em grego significa isso mesmo: esfera de luz. A temperatura média dessa região é aproximadamente 5 500 graus centígrados.

Como foi comentado acima, a fotosfera não é homogênea, mas sim entremeada por granulações, correspondentes aos movimentos convectivos do gás. Além disso, podemos observar áreas mais escuras que o restante da superfície, conhecidas como manchas solares.

3.3.1.2 AS MANCHAS SOLARES

Os chineses, antes da era Cristã, já tinham percebido a existência de regiões escuras no disco do Sol, as chamadas manchas solares. Elas são menos brilhantes que as vizinhanças. Isto é, parecem escuras devido ao contraste com as regiões ao redor, mas elas também emitem luz - como toda a fotosfera.

A presença de manchas solares nos informa a respeito da existência de campos magnéticos intensos na atmosfera solar. Nas manchas o campo magnético é quase 1000 vezes maior que o valor médio solar. Uma vez que o campo magnético inibe o processo convectivo, o transporte de energia nas manchas é bem menor e, conseqüentemente as manchas são significativamente mais frias e portanto menos brilhantes que o restante da

superfície solar. Por este motivo, devido ao contraste com a superfície solar mais brilhante é que as manchas aparecem escuras.

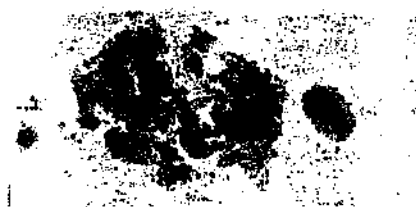


FIGURA 3.5 - GRUPO DE MANCHAS SOLARES.

3.3.1.3 A CROMOSFERA

Acima da fotosfera, a cromosfera estende-se até cerca de 10.000 quilômetros, com uma temperatura que atinge algumas centenas de milhares de graus. Observando-se o Sol com um filtro especial pode-se identificar a cromosfera e distinguir várias estruturas presentes nesta camada: as proeminências, que são estruturas que se erguem do limbo ou formam nuvens escuras sobre o disco, “praias” brilhantes que podem ser vistas sobre o disco associadas às manchas, e uma estreita faixa de espículos¹ que são ejetados para a coroa solar e podem ser vistos quando se observa em direção ao limbo, como é chamado o contorno do Sol.

A fronteira cromosfera-coroa é conhecida como região de transição, uma fina camada de poucas centenas de quilômetros, na qual a temperatura se eleva dos valores cromosféricos até um ou dois milhões de graus, já na base da coroa.

¹ Espículos são pequenos jatos de matéria que se projetam em direção à coroa. Surgem em aglomerados, assemelhando-se a placas de grama. Podem ser vistos quando se observa a atmosfera solar com um filtro que só deixa passar a emissão do hidrogênio. Os espículos projetam-se a alturas de até 15.000 quilômetros, com velocidades de cerca de 20 quilômetros por segundo e possuem uma largura de aproximadamente 2.000 quilômetros, desaparecendo após cerca de 10 minutos, dando lugar a novos conjuntos de espículos.

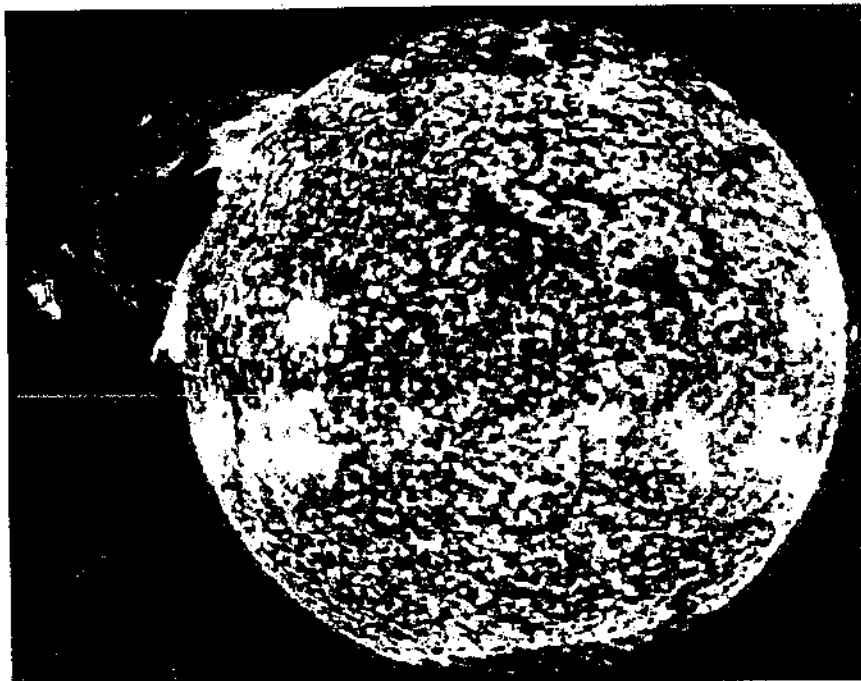


FIGURA 3.6 - PROEMINÊNCIA ERUPTIVA DE GRANDES DIMENSÕES OBSERVADA NO LIMBO SOLAR.

3.3.1.4 A COROA SOLAR

Nos eclipses solares é possível notar a existência de uma camada em torno do Sol de brilho tênue. É a chamada coroa solar. Ela estende-se por milhões de quilômetros em torno do Sol. Essa região é bem menos densa que o Sol propriamente dito, e é muito mais quente que a fotosfera (cerca 1 milhão de graus centígrados!). A coroa, como o restante do Sol, é constituída de plasma (veja quadro a seguir) e produz um fluxo de partículas eletricamente carregadas, o qual chamamos *vento solar*. Ele permeia todo o sistema solar e aumenta nas fases de alta atividade solar. A interação entre o vento solar, o campo magnético da Terra e a atmosfera terrestre dá origem ao fenômeno conhecido como *aurora*, que só pode ser observado próximo aos pólos.

O que é plasma?

Plasma é um gás ionizado, isto é, no qual os átomos estão decompostos em íons de carga positiva e elétrons (carga negativa). Mas, na média, ele é eletricamente neutro.

Devido à grande temperatura da coroa solar, lá são emitidas grandes quantidades de raios X, como pode ser observado por experimentos com detetores a bordo de satélites. Além disso, são observadas as chamadas regiões ativas, locais onde o gás atinge temperaturas e densidades elevadas e campos magnéticos intensos (de centenas a poucos milhares de Gauss). Devido à ação desse campo, as regiões ativas têm formato de ferradura, com as pontas situadas na fotosfera, acima das manchas solares, que formam os pólos magnéticos norte-sul, com em um ímã (figura de um arco). É nas regiões ativas que se observam os fenômenos conhecidos como explosões solares que ocorrem com maior frequência nos períodos de máxima atividade do ciclo solar.

3.3.1.5 AS MANCHAS SOLARES E A ATIVIDADE SOLAR

A maior parte das características da emissão solar está diretamente relacionada à atividade solar cujo aspecto mais marcante é o ciclo de 11 anos, período no qual o número de manchas cresce e atinge um máximo, decrescendo em seguida. O próximo máximo do ciclo de atividade solar será por volta de 2000-2001. No início do período de atividade, surgem em latitudes solares mais elevadas e vão se formando cada vez mais próximas do equador solar, conforme o ciclo vai progredindo em direção ao fim. No caso da polaridade magnética do Sol, o ciclo é de 22 anos, uma vez que a mesma configuração magnético do disco se repete somente após um intervalo médio de tempo de pouco mais de duas dezenas de anos.

Durante o máximo do ciclo de atividade solar ocorre um grande aumento do número de manchas e da ocorrência de fenômenos energéticos associados, conhecidos como explosões solares. Essas explosões caracterizam-se pela emissão de grandes quantidades de energia em intervalos de tempo relativamente curtos, variando de alguns segundos

até poucas horas. Uma explosão solar típica produz uma quantidade de energia equivalente a cerca de 40 bilhões de vezes a energia da bomba atômica lançada em Hiroshima. A energia distribui-se por grande parte do espectro eletromagnético (veja Capítulo 2), estendendo-se desde ondas de rádio até raios X e gama. Nessas explosões pode haver também a emissão de partículas (íons e elétrons) energéticas.



FIGURA 3.7 - "FLARE" OU FLUGURAÇÃO SOLAR.

A explosão solar pode produzir também a ejeção de grandes quantidades de matéria a velocidades que variam de poucas centenas a poucos milhares de quilômetros por segundo, fenômeno conhecido como ejeção de massa coronal. Podem acontecer também sem a ocorrência de explosões solares associadas. Além disso, algumas explosões solares também estão associadas à ocorrência das chamadas tempestades magnéticas na Terra. Quando muito intensas causam grande perturbação na magnetosfera terrestre, podendo até mesmo causar um blecaute.

Outros efeitos importantes da atividade solar são os prejuízos causados em: comunicações, sistemas de navegação, órbita de satélites, exploração de recursos minerais, sistema de fornecimento de energia, oleodutos, clima, sistemas biológicos e também os danos das radiações ionizantes de origem solar que astronautas pela exposição à grande quantidade de radiação.

3.3.1.6 IMPORTÂNCIA DAS PESQUISAS CIENTÍFICAS SOBRE O SOL

Sabemos que a atividade solar e seus efeitos associados não se constituem em um fato isolado uma vez que os fenômenos solares podem atingir a Terra e as atividades

humanas direta ou indiretamente. A lista de consequências dos fenômenos solares nas atividades humanas cresce em proporção à nossa dependência aos sistemas que utilizam a tecnologia, já que estes são muito sensíveis aos efeitos de origem solar. Portanto, por questão de segurança, saúde e manutenção das atividades humanas, é muito importante a investigação científica das origens dos fenômenos solares explosivos e da atividade solar e seus possíveis efeitos na Terra com o intuito de minimizar seus prejuízos sobre as atividades humanas e sobre a vida das pessoas.

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 as estrelas, que constituíam a imensa maioria dos pontinhos brilhantes no céu, possuíam 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 pode ser dita como um astro errante, mas hoje sabemos que não é um planeta, pela definição atual.

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.

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.

Os planetas jovianos são similares a 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. Alguns possuem muitos satélites e todos exibem anéis.

TABELA 3.2 - ALGUNS DADOS ORBITAIS DOS PLANETAS.

Planeta	Semi-eixo maior	Excentricidade da órbita	Período de translação Anos	Período de rotação Dias	Inclinação da órbita graus
Mercurio	0,387	0,2056	0,241	58,785	7,0
Vênus	0,723	0,0068	0,615	243,7	3,39
Terra	1,000	0,0167	1,0	1,0	0,0
Marte	1,524	0,0934	1,881	1,029	1,85
Júpiter	5,203	0,04839	11,862	0,415	1,305
Saturno	9,537	0,05415	29,457	0,439	2,484
Urano	19,191	0,04718	84,011	0,720	0,770
Netuno	30,07	0,00859	164,79	0,673	1,769
Plutão	39,48	0,2488	247,68	6,4047	17,14

O semi-eixo maior da órbita refere-se ao 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. Porém, a emissão

dos planetas jovianos é maior do que a energia que recebem do Sol. Esse excesso de energia pode ser de origem gravitacional ou radiativa.

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) tem 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.

TABELA 3.3 - ALGUNS DADOS FÍSICOS DOS PLANETAS.

Planeta	Massa	Raio Equatorial	Achatamento
Mercúrio	0,0553	0,383	0,0
Vênus	0,815	0,949	0,0
Terra	1,000	1,000	0,0034
Marte	0,107	0,533	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	0,1785	?

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.

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. Possui uma atmosfera muito tênue, quase desprezível, por isso existe uma incrível variação da temperatura, 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.

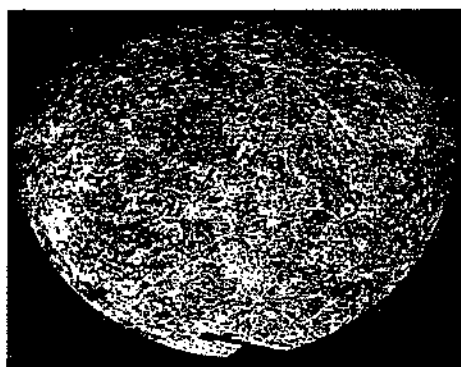


FIGURA 3.8 - O PLANETA MERCÚRIO.

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.

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 ácido sulfúrico. A pressão atmosférica de Vênus é bastante alta, cerca de 100 vezes maior que a da Terra. Por tudo isso, a superfície de Vênus possui condições bem inóspitas.

Efeito estufa

Parte da radiação eletromagnética solar que chega até a superfície de um planeta retorna na forma de radiação infravermelha. O chamado efeito estufa ocorre quando, pela presença de certos gases na atmosfera, como o gás carbônico, boa parte dessa radiação não consegue escapar para o espaço. O resultado é que a atmosfera na superfície fica aquecida. 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.

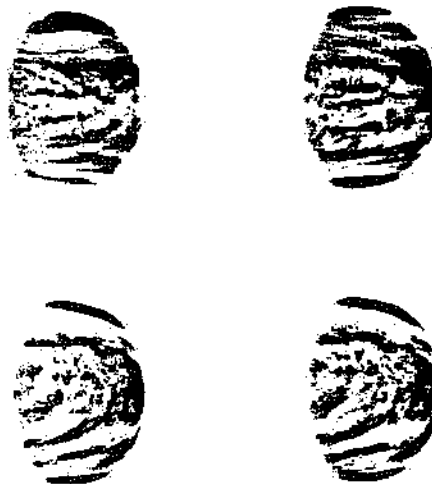


FIGURA 3.9 - O PLANETA VÊNUS.

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).

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.

3.3.2.3 A TERRA

Como já vimos, o planeta em que vivemos era considerado 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, o que é único no sistema solar. 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 presença de água é responsável pela remoção de grande parte do gás carbônico da atmosfera terrestre - o que não aconteceu em Vênus, por exemplo. A água é um dos fatores essenciais que levou à existência da vida.

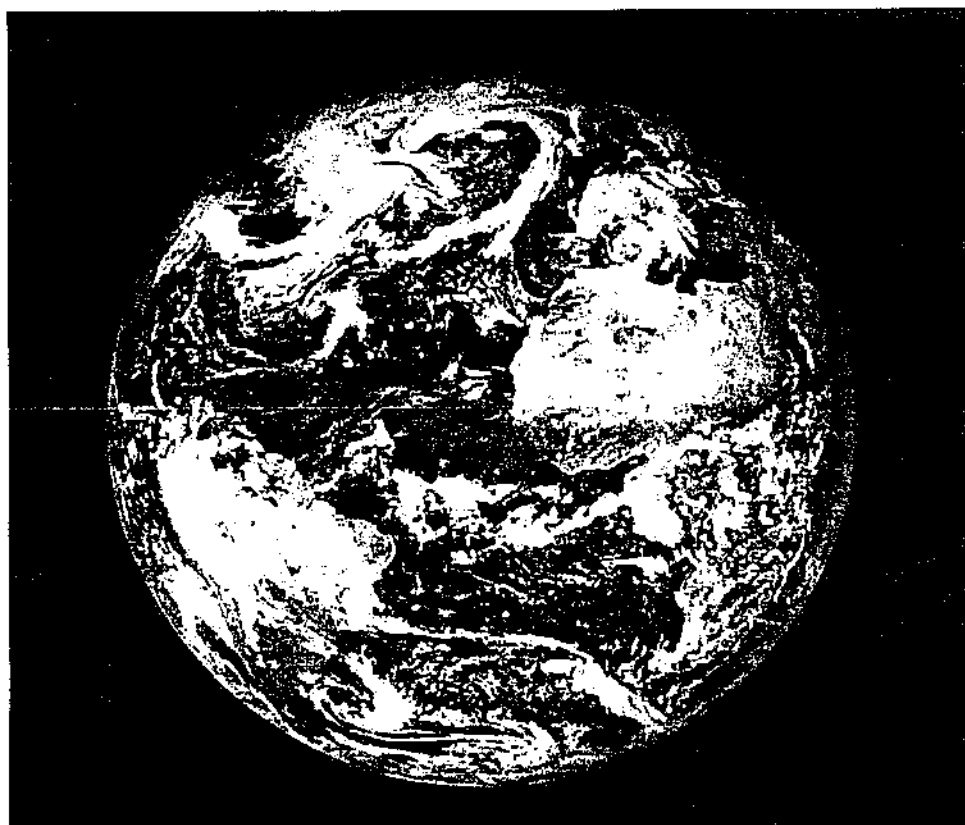


FIGURA 3.10 - O PLANETA TERRA.

A atmosfera terrestre é formada basicamente por nitrogênio (78 %), que dá a cor azul ao nosso planeta. 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.

TABELA 3.4 - ALGUNS DADOS DA TERRA E DA LUA.

Parâmetros	Terra	Lua
Massa	$5,9736 \cdot 10^{24}$ kg	$0,0123 M_{\text{Terra}}$
Raio equatorial	6378 km	$0,2725 R_{\text{Terra}}$
Achatamento	0,0034	0,002
Semi-eixo maior da órbita	149,6 milhões de km	384 mil km
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	23,45 horas	655,7 horas (27,32 dias)

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.

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 10000 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 é mais corretamente definido como um sistema binário.

Entre as possíveis teorias para explicá-la, 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.

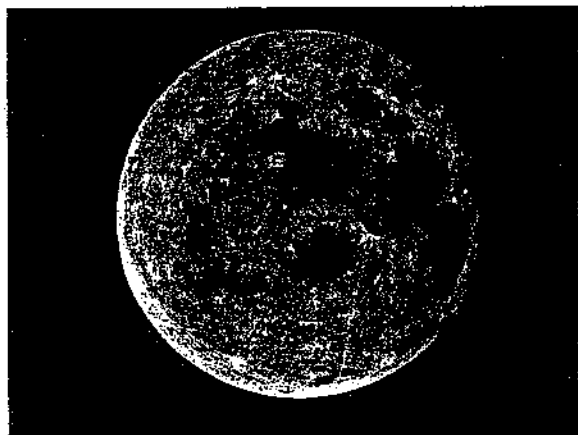


FIGURA 3.11 - A LUA.

3.3.2.4 MARTE

Marte é o planeta telúrico mais distante do Sol. Seu nome corresponde 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, Phobos e Deimos (em grego, Medo e Terror), cujos nomes representam os dois filhos do deus da guerra, Marte, na mitologia grega. São pequenos, da ordem de 10 quilômetros de raio, e possuem forma irregular, como a de uma batata. São provavelmente asteróides capturados pela gravidade do planeta.



FIGURA 3.12 - O PLANETA MARTE.

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 perpendiculares 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 um fenômeno meteorológico, por assim dizer. Ela é bastante grande (10 000 x 25 000 quilômetros) e muito maior que a Terra, por exemplo. É uma estrutura bastante estável.

Júpiter possui pelo menos 16 satélites. Entretanto, quatro deles destacam-se por seu tamanho: Io, Europa, Ganimedes e Calisto. São chamados satélites galileanos, pois foram descobertos por Galileu, no início do século XVII. Ganimedes é o maior satélite do sistema solar. Io e Europa são similares ao planetas telúricos, formados basicamente

por rochas. Io possui vulcões ativos e Europa uma atmosfera de oxigênio. 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.

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



FIGURA 3.13 - O PLANETA JÚPITER E SEU SATÉLITE IO.

3.3.2.6 SATURNO

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

Saturno possui um 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 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 420 000 quilômetros do centro de Saturno), os anéis são extremamente finos, da ordem de algumas dezenas de metros. Enquanto os anéis de Saturno são conhecidos há bastante tempo, os anéis dos demais planetas jovianos só foram descobertos na década de 70.



FIGURA 3.14 - O PLANETA SATURNO.

Saturno possui ao menos 20 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 Antiguidade. Urano foi o primeiro dos planetas a serem descobertos na era moderna, em 1781, por William Herschel. Urano, 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 em 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 Saturno, esses anéis são observados de frente e não lateralmente como os de Saturno, por exemplo.

Esse planeta possui 15 satélites, todos compostos principalmente por gelo. Dentre suas maiores luas, a mais próxima de Urano é Miranda. Ela possui um relevo bastante particular, formado vales e despenhadeiros.

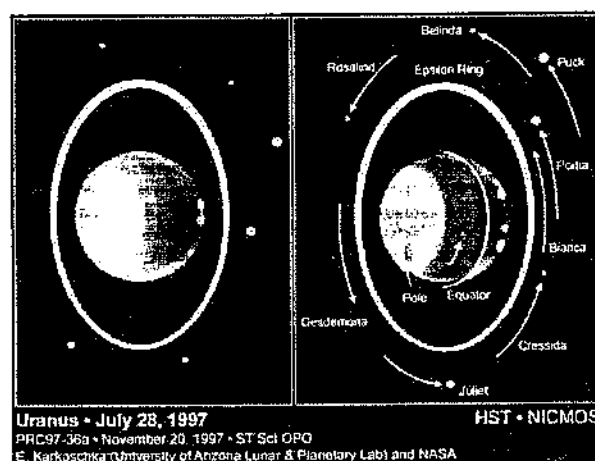


FIGURA 3.15 - O PLANETA URANO COM SEU DISCO E SATÉLITES.

3.3.2.8 NETUNO

Urano foi descoberto e os cálculos matemáticos não reproduziam com exatidão a sua órbita. Foi então previsto que existiria um outro planeta, cuja influência gravitacional era a responsável pelos desvios de sua órbita. Os cálculos feitos independentemente por Le Verrier e Adams previram a existência de Netuno, que foi primeiramente observado por Galle e d'Arrest em 1846.

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 8 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.

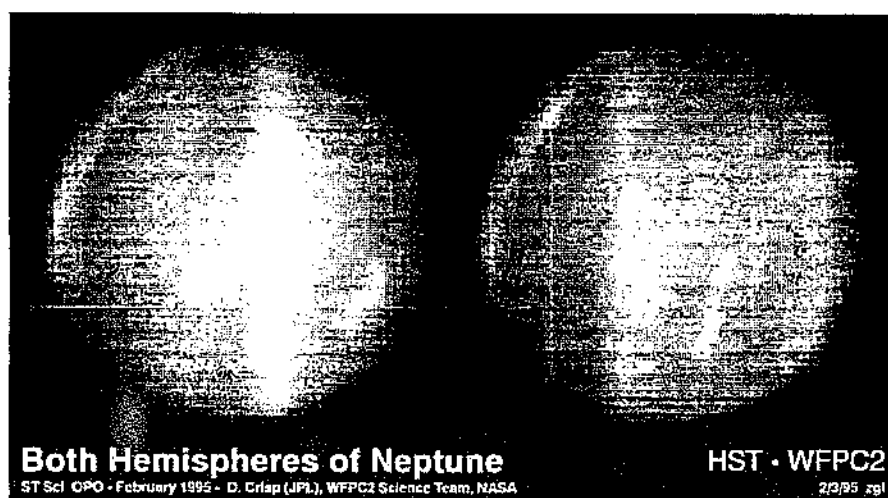


FIGURA 3.16 - OS DOIS HEMISFÉRIOS DO PLANETA NETUNO.

3.3.2.9 PLUTÃO

Tonbaugh, em 1930, descobriu Plutão, o último dos planetas do sistema solar. Plutão, na mitologia, é o deus romano do mundo dos mortos (Hades, em grego). Sua órbita é tão excêntrica, que sua distância ao Sol pode variar em 40%. Mais que 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. Parece apresentar uma pequena atmosfera de metano (NH_4). Possui um satélite, Caronte, nome do barqueiro, que na mitologia, atravessa o rio levando as almas para o Hades. É um pequeno satélite, menor que a nossa Lua, composto basicamente por rochas e gelo, mas de tamanho comparável ao de Plutão (metade deste). Assim, pode-se considerar que ambos formam um sistema duplo de planetas.



FIGURA 3.17 - O PLANETA PLUTÃO E SEU SATÉLITE CARONTE.

3.3.3 OS COMETAS

O sistema solar não é apenas o Sol e os planetas. Os cometas pertencem também ao sistema solar. O núcleo de um cometa deve ser 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 começa a sublimar e se forma 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 do gás e a de poeira. Os cometas não são como os planetas ou asteroídes, cujas órbitas se restringem ao plano do sistema solar. Suas órbitas possuem inclinações as mais variadas, com excentricidades bastante altas e raios muito grandes, maiores que os dos planetas mais distantes.

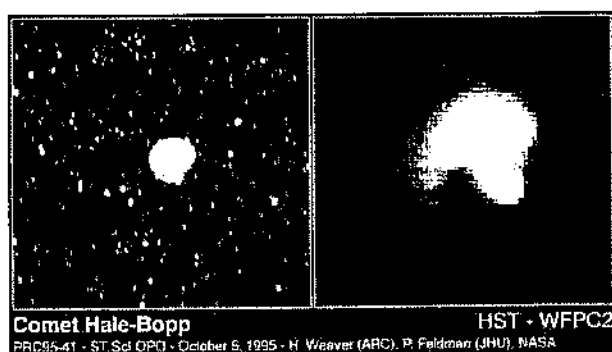


FIGURA 3.18 - O COMETA HALE-BOPP.

Hoje acredita-se que os cometas são resquícios do tempo de formação do sistema solar. Sua composição deve ser a mesma da nuvem primordial que deu origem ao Sol e aos planetas. Mas, de onde vêm os cometas? Possivelmente da chamada Nuvem de Oort. Supõe-se que ela seja uma nuvem de gás, poeira e cometas que circunda todo o sistema solar, formando uma casca esférica.

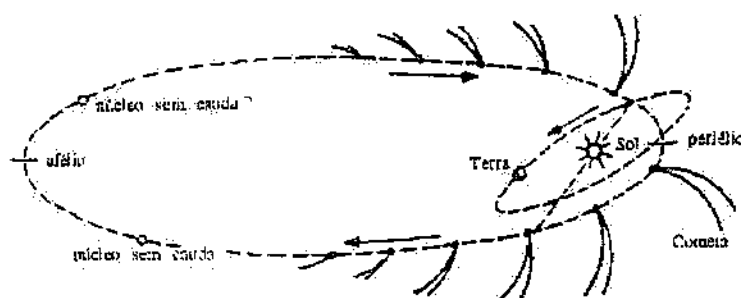


FIGURA 3.19 - UM EXEMPLO DE ÓRBITA DE COMETA.

3.3.4 OS ASTERÓIDES

Os asteróides são similares aos planetas, mas 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. Teríamos um cinturão de asteróides. 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 podem 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).

3.3.5 OS METEOROS E METEORITOS

Qual a diferença entre meteoro 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.

Os meteoritos são fragmentos de cometas ou 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.

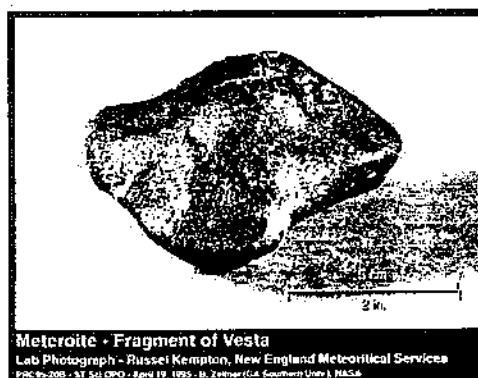


FIGURA 3.20 - UM METEORITO.

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 de 200 a 250 km de diâmetro, 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.

3.4 A DINÂMICA DO SISTEMA SOLAR

Os movimentos de todos os objetos do sistema solar podem ser explicados pela teoria da gravitação proposta por Newton. Os diferentes corpos atraem-se mutuamente e a força exercida sobre cada um deles determina o seu movimento.

3.4.1 AS LEIS DE KEPLER

No início do século XVII, Kepler derivou três leis empíricas que descrevem o movimento dos planetas.

- Forma das órbitas: A órbita de um planeta é uma elipse com o Sol em um dos focos. Assim as distâncias entre um planeta e o Sol são variáveis ao longo da translação do planeta.

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

- Relação entre período e distância: O quadrado do período de translação de um planeta é proporcional ao cubo do semi-eixo maior da órbita.

Essas leis podem ser provadas usando a teoria da Gravitação.

3.4.2 A LEI DE TITIUS-BODE

No século XVIII, dois astrônomos alemães, Titius e Bode, descobriram que as distâncias, D , dos planetas ao Sol seguiam uma lei com a seguinte forma:

$$D_n = 0.4 + 0.3 \cdot 2^n,$$

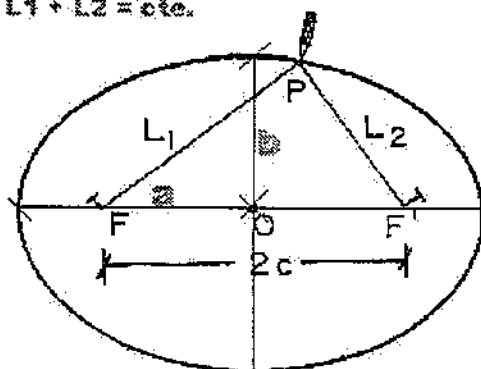
onde n possui os valores de $-\infty$ para Mercúrio, 0 para Vênus, 1 para a Terra, 2 para Marte e assim sucessivamente. O número 3 corresponde ao cinturão de asteróides entre as órbitas de Marte e Júpiter.

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

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.

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



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.

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 milhões 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 formação do sistema solar a partir de uma nuvem de gás foi primeiramente proposta por Kant e Laplace de modo independente. Apesar de outras teorias terem surgido, esta é ainda a teoria mais aceita sobre a formação estelar e é corroborada por observações de outras estrelas.

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 planetas, entre eles a Terra.

Originalmente, o sistema solar deveria ser apenas uma imensa e densa nuvem de gás e poeira (lembrem-se que poeira é matéria no estado sólido). Em algum momento, essa nuvem começou a se contrair devido à autogravidade. O estopim de um processo desse tipo pode ter sido uma explosão de uma estrela chamada supernova (leia sobre supernovas no Capítulo 4 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 5 bilhões de anos atrás, era muito diferente do que é hoje. Ele evoluiu, exatamente 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, mais precisamente em 10 anéis. Essas anéis iriam transformar-se nos planetas. Mas só conhecemos 9 planetas. Onde está o décimo anel? Um dos anéis não deu origem a um planeta, mas continua até hoje como um anel. É o chamado cinturão de asteroídes, 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.

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, só 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.

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

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.

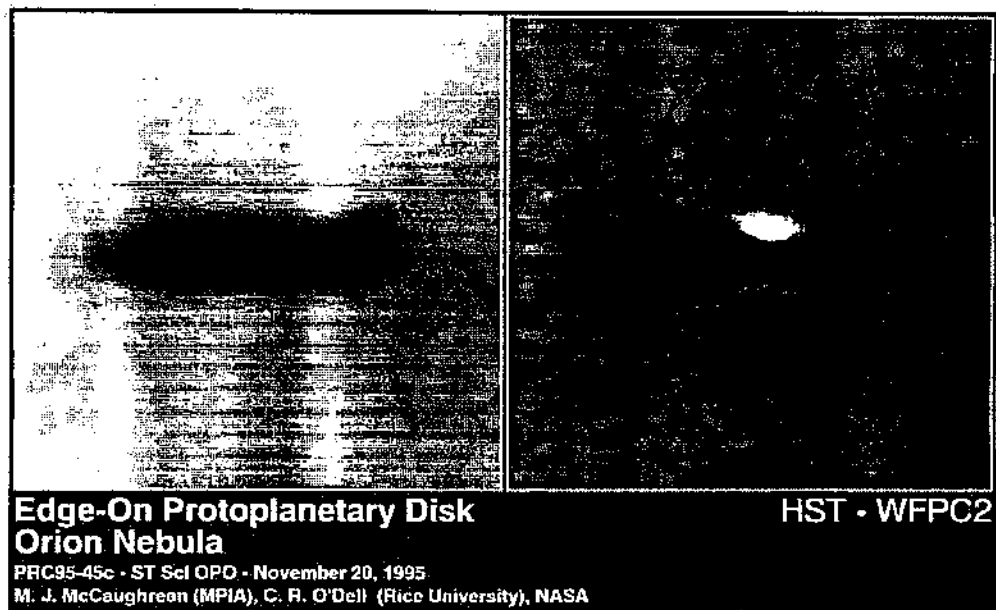


FIGURA 3.21 - UM DISCO PLANETÁRIO OBSERVADO NA REGIÃO DE ÓRION.

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 fracos, pequenos e próximos da estrela, a sua detecção direta é longe de ser trivial. Existe, porém, uma maneira indireta. 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. Essa técnica já permitiu a detecção de alguns planetas fora do sistema solar.

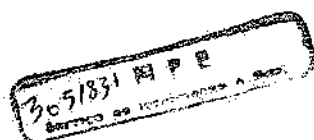
3.7 BIBLIOGRAFIA

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.

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.



Capítulo 4

ESTRELAS

Hugo Vicente Capelato^{*}

^{*} e-mail: hugo@das.inpe.br

ESTRELAS

LISTA DE FIGURAS.....	4-5
4.1 INTRODUÇÃO.....	4-7
4.2 A COR E O BRILHO DAS ESTRELAS	4-8
4.2.1 A SEQUÊNCIA PRINCIPAL DE ESTRELAS	4-10
4.2.2 ACIMA DA SEQUÊNCIA PRINCIPAL	4-11
4.2.3 ABAIXO DA SEQUÊNCIA PRINCIPAL	4-12
4.2.4 AS ESTRELAS VARIÁVEIS	4-12
4.3 O INTERIOR DAS ESTRELAS.....	4-13
4.3.1 AS ESFERAS DE GÁS QUENTE.....	4-13
4.3.2 DIFERENÇA DE PRESSÕES = PESO DA CAMADA	4-14
4.3.3 POR QUE AS TEMPERATURAS SÃO TÃO ALTAS ?.....	4-15
4.3.4 CONVECÇÃO E ONDAS SONORAS NAS ESTRELAS	4-17
4.4 A GERAÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR NAS ESTRELAS	4-19
4.4.1 OS NÚCLEOS ATÔMICOS	4-20
4.4.2 FUSÃO OU FISSÃO ?.....	4-22

4.4.3	ENERGIA = MASSA X C^2	4-23
4.4.4	O EFEITO TÚNEL	4-23
4.4.5	INTERAÇÕES FRACAS	4-24
4.5	O NASCIMENTO DAS ESTRELAS.....	4-25
4.5.1	AS NUVENS INTERESTELARES: BERÇÁRIO DAS ESTRELAS.....	4-25
4.5.2	POR QUE NASCEM AS ESTRELAS ?	4-27
4.5.3	A VIDA DAS PROTO-ESTRELAS	4-28
4.6	VIDA E MORTE DAS ESTRELAS	4-29
4.6.1	A ESTRELA ESGOTA O SEU RESERVATÓRIO DE HIDROGÊNIO	4-29
4.6.2	A VELHICE	4-30
4.6.3	GIGANTES VERMELHAS E ANÃS BRANCAS.....	4-30
4.6.4	AS SUPERNOVAS.....	4-32
4.6.5	ESTRELAS DE NEUTRONS E BURACOS NEGROS	4-34
4.7	BIBLIOGRAFIA	4-35

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 4.1 - O DIAGRAMA H-R, QUE MOSTRA COMO AS ESTRELAS SE DISTRIBUEM CONFORME SUA COR (TEMPERATURA) E BRILHO (LUMINOSIDADE).	4-9
FIGURA 4.2	4-15
FIGURA 4.3 - ESTA FIGURA ILUSTRA COMO OS FÓTONS DE RADIAÇÃO SE DIFUNDEM ATRAVÉS DE UMA ESTRELA COMO O SOL.	4-19
FIGURA 4.4 - A CURVA DA ENERGIA DE LIGAÇÃO DOS DIFERENTES NÚCLEOS ATÔMICOS.	4-21
FIGURA 4.5 - AS ESTRELAS DAS PLÊIADES NASCERAM APROXIMADAMENTE HÁ 60 MILHÕES DE ANOS ATRÁS E AINDA ESTÃO “VESTIDAS” COM OS RESTOS DE SUA NUVEM-MÃE.	4-26
FIGURA 4.6 - NEBULOSA PLANETARIA. ESTA É A NEBULOSA DA HÉLICE, A MAIS PRÓXIMA DE TODAS AS NEBULOSAS PLANETARIAS (450 ANOS-LUZ).	4-31
FIGURA 4.7 - A NEBULOSA DO CARANGUEJO NA CONSTELAÇÃO DO TOURO É UMA DAS FONTES MAIS INTENSAS EM ONDAS DE RADIO E TAMBÉM EM RAIOS-X E ULTRA-VIOLETA.	4-34

4.1 INTRODUÇÃO

Vamos começar o nosso estudo por uma inspeção mais ou menos superficial na “floresta” de estrelas que vemos nos céus. A primeira coisa que notamos é que elas são fontes de luz muito mais fracas que o Sol. A segunda coisa é que suas cores aparentes são variáveis, desde um branco azulado da maioria, até o um amarelo avermelhado, um pouco mais raro. Há ainda um terceiro aspecto, embora este já não seja muito óbvio a olho nu: é que a maioria das estrelas agrupam-se em pequenas famílias de dois, três ou mais membros. Um bom exemplo disto é a estrela Alfa do Centauro, a estrela mais próxima de nós, que na verdade é um sistema *triplo* de estrelas. Outro é o grupo de 7 estrelas que formam as *Plêiades*, discutido mais adiante¹. Na verdade quase metade das estrelas fazem parte de sistemas duplos, de apenas dois membros, chamados *estrelas binárias*. A maioria destas estrelas duplas, embora vivam juntas, distam entre si várias *unidades astronômicas* (uma unidade astronômica, UA, é a distância da Terra ao Sol; veja o Cap. 1), movendo-se uma em torno da outra com períodos de vários anos. Existem no entanto estrelas binárias cuja separação é muito menor e que se movimentam com períodos de apenas algumas horas! Estas estrelas estão tão próximas uma da outra que são capazes de trocar entre si seu material envoltório. Muitas vezes esta troca ocorre de maneira um pouco violenta, e então podem acontecer explosões locais que expulsam a matéria para longe do sistema. Em outros sistemas binários, onde acontece que uma das componentes seja uma estrela muito compacta e densa, o material da companheira flui mais calmamente, formando um disco luminoso em torno da estrela compacta.

A distância média que separa estrelas vizinhas (ignorando os sistemas binários) é de cerca de 4 anos-luz. Esta distância equivale a 253.000 unidades astronômicas ou a 27 milhões de vezes o diâmetro do Sol: o espaço entre as estrelas é imenso, comparado com o tamanho das estrelas, ou mesmo do Sistema Solar.

¹ Mas não confunda estes grupos estelares de que falamos aqui, com as constelações tradicionais. Estas, na sua grandíssima maioria, não passam de configurações *aparentes* de estrelas, sem nenhuma relação entre si (veja o Cap. 1).

4.2 A COR E O BRILHO DAS ESTRELAS

Assim como o Sol, as estrelas são bolas de gás muito quente que emitem sua radiação para o espaço. Há duas propriedades das estrelas que são de interesse imediato: a sua cor e o seu brilho. A **cor** de uma estrela é determinada pela *temperatura* em que se encontra a sua superfície², enquanto que o seu **brilho** é determinado pela *quantidade de luz que ela irradia por segundo*, através de toda a sua superfície. Podemos construir um diagrama de cor versus brilho das estrelas, como na Figura 4.1, onde cada ponto indica o brilho e a cor de uma determinada estrela. Um diagrama deste tipo é conhecido como diagrama de Hertzsprung-Russel (HR).

O Sol tem uma cor intermediária amarelo-claro. A sua temperatura na superfície é de cerca de 5 800 K (graus Kelvin³). Uma grande parte das estrelas é parecida com o Sol, com cores e tamanhos comparáveis. Outras estrelas são bem maiores e vermelhas: são as estrelas *gigantes vermelhas*, cuja temperatura na superfície é da ordem de 3 000 K. Há ainda estrelas de cor branca e tamanho muito pequeno, quase tão pequenas quanto a Terra: são as estrelas *anãs brancas*, que tem temperaturas superficiais da ordem de 10000 K.

O brilho⁴ de uma estrela é a taxa com que a sua energia luminosa é emitida. O brilho de uma estrela depende somente da sua temperatura superficial e da área total de sua superfície. As estrelas gigantes vermelhas, de temperaturas relativamente baixas, tem uma grande área superficial, por isso são estrelas brilhantes, luminosas. A estrela Betelgeuse, na constelação de Orion, é um bom exemplo de uma estrela gigante vermelha. Já as estrelas anãs brancas tem altas temperaturas superficiais mas, por serem muito pequenas, tem áreas superficiais também muito pequenas e são muito pouco brilhantes: impossível enxergar qualquer uma delas a olho nu! No diagrama H-R da

² Quanto mais quente for um objeto, mais azul será a radiação por ele emitida. Esta lei da física foi estabelecida em 1898 por Wilhem Wien. Podemos vê-la em funcionamento, observando a cor da chama de um fogão de cozinha: uma chama bem azulada indica uma chama quente, enquanto que uma chama mais avermelhada indica uma chama mais fria.

³ Para obter a temperatura em graus Celsius (°C), subtraia 273 do valor em graus Kelvin. A temperatura da superfície do Sol portanto é 5 527 °C.

⁴ Neste capítulo estaremos sempre falando do brilho *absoluto* da estrela, diferente do seu brilho *aparente* o qual varia conforme a distância em que ela se encontra – veja o Cap. 2 a este respeito.

Figura 4.1 nós desenhamos também as linhas tracejadas que indicam os lugares onde devem cair as estrelas de mesmo raio⁵: é fácil ver quão correto foi batizar de *Super-gigante* uma estrela como Betelgeuse.

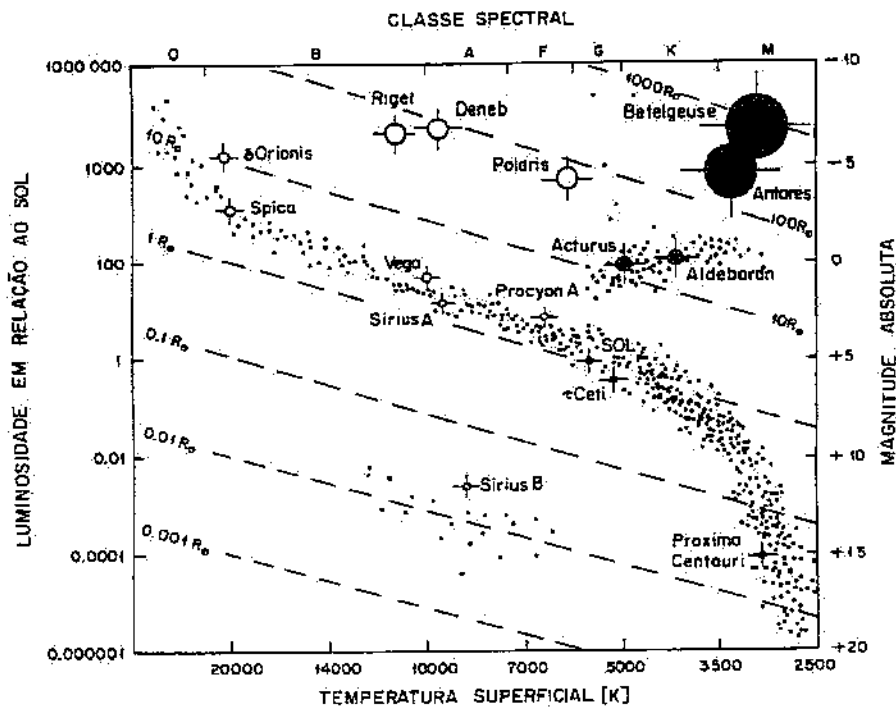


FIGURA 4.1 - O DIAGRAMA H-R, QUE MOSTRA COMO AS ESTRELAS SE DISTRIBUEM CONFORME SUA COR (TEMPERATURA) E BRILHO (LUMINOSIDADE). AS LINHAS TRACEJADAS INDICAM COMO SE POSICIONAM AS ESTRELAS DE MESMO TAMANHO FÍSICO (I. É, MESMO RAIO). AS ESTRELAS “ANÃS” SITUAM-SE NAS REGIÕES INFERIORES DO GRÁFICO E AS “GIGANTES” NAS REGIÕES SUPERIORES. ALGUMAS ESTRELAS CONHECIDAS FORAM DESTACADAS COM SÍMBOLOS INDICANDO O SEU TAMANHO RELATIVO (SEM SEGUIR NENHUMA ESCALA VERDADEIRA).

Muitas vezes nós estamos interessados na quantidade total de radiação⁶ emitida por segundo pela estrela. Uma parte desta radiação pode nem ser detectável pelos nossos

⁵ Medidos com relação ao raio do Sol, simbolizado por $R_{\odot}$ ($R_{\odot} = 696.000 \text{ km}$)

olhos. Neste caso, no lugar de falar de brilho para a radiação total (visível e invisível), falamos da *luminosidade* da estrela. A luminosidade de uma estrela é a potência que ela é capaz de gerar no seu interior, em geral através de reações nucleares *de fusão* (ao contrário dos reatores de energia do tipo dos instalados em Angra dos Reis, aonde as reações nucleares são *de fissão* – adiante discutiremos isso). A luminosidade do Sol é $3,8 \times 10^{26}$ Watts, valor que simbolizamos por $L_{\odot}$. Para as outras estrelas, preferimos medir suas luminosidades com referência à luminosidade do Sol: a estrela Betelgeuse, por exemplo, tem luminosidade de $10^4 L_{\odot}$, quer dizer, ela é 10 000 vezes mais luminosa que o Sol. No diagrama H-R da Figura 4.1, o brilho das estrelas está expresso em termos da sua luminosidade, enquanto a cor está em termos da sua temperatura superficial.

4.2.1 A SEQUÊNCIA PRINCIPAL DE ESTRELAS

Quando examinamos como se distribuem os pontos correspondentes às estrelas no diagrama H-R (Figura 4.1), algo notável aparece: os pontos não se distribuem aleatoriamente por todo o diagrama. Ao contrário, eles tendem a se concentrar em algumas regiões definidas. A maioria das estrelas, incluindo o nosso Sol, ficam numa faixa que corre mais ou menos diagonalmente pelo diagrama. Esta faixa é denominada *Sequência Principal*, e as estrelas que aí se localizam são chamadas de *estrelas da Sequência Principal*. Aqui, as estrelas *mais vermelhas* - mais frias superficialmente – são as *menos luminosas*, enquanto que as estrelas mais azuis - mais quentes - são as mais luminosas.

As massas das estrelas pode variar bastante. Na sequência principal, as estrelas que têm maior massa são as mais brilhantes e, portanto, mais azuis e mais quentes superficialmente. Ao contrário, as estrelas de *menor massa* são as *menos brilhantes* e, portanto, *mais vermelhas e mais frias*. As massas das estrelas na sequência principal variam bastante. Uma fração considerável de estrelas tem massas entre 0,1 vezes a 10 vezes a massa do Sol⁷, mas a maior parte tem massas da ordem de $0,8 M_{\odot}$, ou pouco

⁶ Radiação eletromagnética ! Recorde das lições do capítulo 2: a *luz* que vemos é uma forma de radiação eletromagnética, assim como o são as ondas de *radio* ou os *raios-X*.

⁷ simbolizado por $M_{\odot}$ - $M_{\odot} = 2 \times 10^{33}$ gramas.

menor: são as anãs-vermelhas, muitas vezes encontradas como companheiras invisíveis de estrelas normais. Mas existem também algumas estrelas cujas massas podem chegar até a $60 M_{\odot}$. Essas estrelas são 10 milhões de vezes mais brilhantes que o Sol: se Alfa do Centauro fosse uma delas, brilharia no nosso céu tanto quanto a Lua cheia! As estrelas da sequência principal também nunca são muito grandes: os seus raios variam de 0,001 até 25 vezes o raio do Sol, no caso das estrelas mais brilhantes.

Todas as estrelas da sequência principal produzem a energia que irradiam através de reações nucleares muito semelhantes àquelas que ocorrem durante a explosão de uma bomba-H: *convertendo núcleos de hidrogênio em núcleos de hélio*. Cerca de 80% da massa destas estrelas está na forma de hidrogênio, de modo que fica claro que elas tem combustível para passar muito tempo na sequência principal. As de maior massa, porque são mais brilhantes, devem passar um tempo menor: como sua luminosidade é desproporcionalmente maior, elas devem “queimar” seu hidrogênio mais rapidamente que as estrelas com massa menor.

Quando o “combustível” hidrogênio começa a faltar no centro das estrelas da sequência principal, elas começam a sair da sequência principal. O seu destino então será o de se expandirem e se transformarem em estrelas gigantes vermelhas.

4.2.2 ACIMA DA SEQUÊNCIA PRINCIPAL

No diagrama H-R, acima da sequência principal, encontramos as *estrelas gigantes vermelhas*. Estas estrelas são esferas distendidas de gás – algumas vezes chegam a ser maiores que a órbita da Terra em torno do Sol - frias e luminosas. Embora a sua temperatura superficial seja baixa, as suas áreas superficiais são tão grandes que fazem com que elas tenham altíssimas luminosidades, de centenas a milhares de vezes superiores à do Sol.

As gigantes vermelhas são estrelas que já esgotaram boa parte de suas reservas de hidrogênio: como, então, podem emitir tanta energia para serem assim luminosas? Estas estrelas deixaram a sequência principal e agora as *suas regiões centrais estão se contraindo*, na busca de fontes alternativas de energia nuclear. Nesta contração, uma

parte da *energia potencial gravitacional* contida na estrela é liberada. É esta energia que provê a sua luminosidade. Mas isto somente por curtos períodos, até que outros “combustíveis” nucleares possam entrar em “ignição”. Adiante iremos rever estas questões com maiores detalhes.

4.2.3 ABAIXO DA SEQUÊNCIA PRINCIPAL

Abaixo da sequência principal encontram-se as estrelas anãs-brancas. Estas estrelas tem aproximadamente o tamanho da Terra, embora sua massa seja da ordem da massa do Sol. São, portanto, estrelas muito densas. Como elas são pequenas, embora tenham altas temperaturas superficiais, não são muito luminosas.

As anãs-brancas são o último estágio da evolução de muitas estrelas. Nesta fase a sua luminosidade é unicamente devida à energia térmica ou seja, calor, ainda disponível: a estrela se esfria lentamente. Mais de 10% das estrelas na nossa vizinhança são anãs-brancas, mas elas são muito difíceis de serem vistas, dada a sua fraca luminosidade.

Nem todas as estrelas, no entanto, terminam suas carreiras como anãs-brancas. Algumas tornam-se estrelas de nêutrons, e outras ainda transformam-se em buracos negros.

4.2.4 AS ESTRELAS VARIÁVEIS

A maioria das estrelas têm brilho praticamente constante no tempo. Ocorrem sempre pequenas variações, erráticas, em geral imperceptíveis a olho nu. Isto sem contar, é claro, com a lenta – lentíssima - variação de brilho devido ao fato que as estrelas evoluem, mudando lentamente de posição no diagrama HR. Mas isto só seria notável em escalas de tempo de 10.000 ou 100.000 anos ! Contudo, em certas fases da vida estelar a evolução pode muito mais rápida e então as variações de brilhos podem vir a ser mesmo espetaculares. Mais adiante voltaremos a isto.

Existe também uma minoria de estrelas cujo brilho varia periodicamente, aumentando e diminuindo em escalas de meses, dias ou mesmo em escala de horas. Estas estrelas são chamadas de *estrelas variáveis*. Na verdade, mais de 25% de todas as estrelas variáveis não tem de fato o seu brilho variável: são na realidade sistemas binários

eclipsantes, nos quais a aparente variação do brilho se deve ao fato de uma das estrelas componentes eclipsar a outra, ao passar pela sua frente.

As estrelas variáveis “de fato” são estrelas que periodicamente se expandem e se contraem, pulsando tanto em brilho como em tamanho. Por isso são também denominadas *estrelas pulsantes*. Uma importante classe de estrelas pulsantes são as estrelas conhecidas como *cefeidas*. São estrelas que se encontram acima da sequência principal, com brilhos de 100 a 10 000 vezes o do Sol. Têm cores ligeiramente mais avermelhadas que o Sol. Seus períodos de pulsação variam entre 3 a 50 dias, e em cada pulsação seus brilhos podem variar de até 5 vezes em relação ao seu brilho médio. As cefeidas são estrelas de massa maior que o Sol e que já evoluíram além do estágio de gigantes vermelhas. Elas oscilam porque assim podem liberar mais facilmente a radiação aprisionada no seu interior.

As cefeidas são também importantes porque podem ser usadas como indicadores de distância. Acontece que o período de pulsação de uma cefeida está relacionado com o seu brilho médio: quanto maior este, maior será o período. Então, se medirmos o período de uma cefeida, coisa relativamente fácil de fazer, poderemos calcular a sua luminosidade. Comparando esta com o brilho aparente da estrela, podemos calcular a sua distância. É bom lembrar que a medida de distâncias, sobretudo as mais longínquas, é uma das tarefas mais difíceis na astronomia. Por causa disto, uma das missões mais importantes do telescópio espacial Hubble foi medir os períodos de estrelas cefeidas pertencentes às galáxias mais próximas de nós: assim, conseguiu-se medir a distância destas galáxias, coisa impossível até então.

4.3 O INTERIOR DAS ESTRELAS

4.3.1 AS ESFERAS DE GÁS QUENTE

As estrelas são enormes bolas de gás muito quente e de radiação eletromagnética, que irradiam energia no espaço interestelar. Esta energia, que é emitida na superfície da estrela, é produzida no seu interior mais profundo, sendo lentamente difundida por toda

a estrela até escapar pela sua superfície. Todos nós sabemos que o calor, isto é, a energia térmica, sempre flui das regiões quentes para as regiões frias. Isto implica que o centro da estrela deve ser muito mais quente que a sua superfície. Na verdade, a temperatura central das estrelas é estupidamente grande. No Sol, por exemplo, a temperatura central deve atingir os 15×10^6 K, quer dizer, algo como 2.500 vezes maior que a sua temperatura na superfície. Na sequência principal, a temperatura central das estrelas varia de maneira aproximadamente proporcional à massa da estrela: uma estrela de $60 M_{\text{sol}}$ da sequência principal deve ter então uma temperatura central da ordem de $60 \times T_{\text{central do Sol}} = 900 \times 10^6$ K, quase 1 bilhão de graus !!!

As estrelas são bolas de gás quente *auto-gravitantes* : essa palavra significa que a estrela é mantida coesa por causa da ação das forças gravitacionais geradas por ela própria, isto é, por sua própria massa. Imagine um pedacinho da estrela a uma certa distância do centro da estrela: a força de gravidade produzida pelo resto da massa da estrela *interior* à posição do nosso pedacinho é que produz o seu peso, que o puxa em direção ao centro da estrela. O peso do nosso pedacinho tem que ser contrabalançado por uma outra força, senão ele cairia em direção ao centro e, como ele, o restante da estrela, que assim iria colapsar. Esta força é exercida pela pressão do gás quente que constitui o interior da estrela⁸. Se, numa fantasia, fosse possível “desligar” a pressão do gás no interior do Sol, bastaria 1 hora para ele colapsar e se transformar num buraco negro.

O balanço entre a pressão do gás (na verdade a diferença, ou gradiente, de pressão) e a gravitação é fácil de ser entendido. Considere no interior da estrela uma camada esférica imaginária, feita do gás contido entre as suas duas superfícies, tal como na Figura 4.2.

Do lado da superfície interna da camada, a pressão do gás da estrela empurra a camada para fora, enquanto que na superfície externa, o gás da estrela *pressiona* a camada para dentro. Como a estrela está em equilíbrio, a camada não se move: será o próprio peso da camada que irá contrabalançar a diferença entre as pressões externa e interna, de modo que:

⁸ Além do gás, o campo de radiação eletromagnética também exerce uma pressão que contribui significativamente para o equilíbrio da estrela.

$$\text{Diferença de pressões} = \text{peso da camada}^9$$

Esta expressão é conhecida como *equação de equilíbrio hidrostático*. A estrela pode ser imaginada como constituída por um grande número de camadas esféricas concêntricas, de modo que, à medida que vamos prosseguindo em direção ao centro, a pressão do gás *crece* ao passarmos de uma camada para outra. No centro, a pressão atinge o seu valor máximo. Nas regiões centrais das estrelas a pressão do gás atinge valores fantasticamente grandes: no centro do Sol ela é de 10^{11} atm (100 bilhões de atmosferas), o que equivaleria, na Terra, a uma coluna pesando 100 milhões de toneladas, cuja base fosse uma moedinha de 1 centavo!

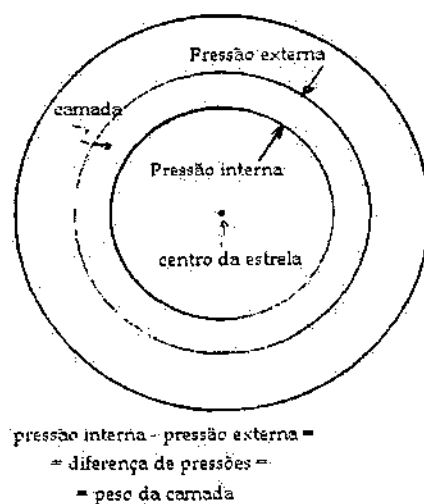


FIGURA 4.2

4.3.2 POR QUE AS TEMPERATURAS SÃO TÃO ALTAS ?

A densidade média de massa do Sol é cerca de $1,4 \text{ g/cm}^3$ (gramas por centímetro cúbico), isto é, 1,4 vezes a densidade da água. No entanto, a densidade no centro do Sol é mais de 100 vezes maior, aproximadamente 150 g/cm^3 . Não existe nada parecido no mundo das substâncias sólidas ou líquidas: nenhum sólido ou líquido pode existir a

⁹ Mais corretamente esta equação deveria ser escrita assim: $P_{\text{int}} \cdot A_{\text{int}} - P_{\text{ext}} \cdot A_{\text{ext}} = \text{peso da camada}$, sendo P_{ext} e P_{int} as pressões externa e interna respectiva e A_{ext} e A_{int} as áreas externa e interna, respectivamente, da camada.

estas densidades, suportando as enormes pressões que prevaleceriam. Na verdade, a única forma de matéria possível no Sol (e nas estrelas em geral), é a forma gasosa, a temperaturas extremamente altas.

A pressão de um gás é proporcional ao produto da sua temperatura pela sua densidade. Resulta, então, que para termos altas pressões necessitamos altas temperaturas. Esta é a razão das altas temperaturas no interior das estrelas: a necessidade de grandes pressões que equilibrem a força de gravidade produzida pela enorme quantidade de massa que as estrelas contém.

Um gás a temperaturas de milhões de graus não se parece em nada com aqueles que estamos familiarizados (p. ex., a atmosfera em que vivemos). Os átomos se movem a altíssimas velocidades, centenas de quilômetros por segundo ¹⁰. Quando eles colidem uns com os outros – e isto acontece com frequência nestes meios tão densos – a interação é tão violenta que todos os elétrons são arrancados e os átomos tornam-se completamente ionizados. O gás então consiste, de fato, de núcleos atômicos e elétrons movendo-se independentemente. A radiação que é produzida neste gás quente e denso é constituída de raios X intensos, e não daquela radiação luminosa que escapa da superfície relativamente fria da estrela. No entanto, cada fóton de raios X do interior estelar viaja em média somente cerca de 0,0001 cm, antes de ser capturado ou desviado por algum núcleo ou elétron do gás.

Isto explica porque as estrelas, ao contrário dos planetas, são intrinsecamente luminosas. No seu interior elas são extremamente quentes devido às altas pressões necessárias para contrabalançar a gravidade. É a radiação produzida por este gás quente, lentamente escapando em direção à superfície, que é responsável pela luminosidade da estrela. As reações nucleares que ocorrem no seu interior compensam esta perda de energia, de modo que a estrela pode se manter luminosa por grandes períodos de tempo. Assim, em última análise, as estrelas são intrinsecamente luminosas por causa das enormes massas que contém (e não por causa da energia nuclear produzida no seu interior).

¹⁰) A velocidade média das partículas de um gás varia aproximadamente com a raiz quadrada da sua temperatura (mais exatamente, com $\sqrt{T/m_p}$, onde m_p é a massa da partícula). Na nossa atmosfera, a temperaturas de 27°C = 300 K, as moléculas de oxigênio tem velocidades médias de aproximadamente 0,5 km/s

4.3.3 CONVECÇÃO E ONDAS SONORAS NAS ESTRELAS

A radiação que é produzida originalmente nas regiões centrais das estrelas está sendo constantemente desviada, ou então absorvida e reemitida, pelas partículas (núcleos + elétrons) do gás¹¹. Estes processos dificultam, ou mesmo bloqueiam, o fluxo da radiação em direção à superfície (como na Figura 4.3). Esta resistência ao fluxo da radiação é chamada de *opacidade*. Quando a opacidade é alta, como muitas vezes acontece, o gás bloqueia a radiação e então o transporte de calor das regiões de alta temperatura em direção a superfície tem que ser feito por *convecção*: o gás se põe em movimento formando correntes ascendentes quentes e correntes descendentes frias, carregando para cima a energia térmica do interior. No Sol, as partes mais externas tem opacidade muito alta, o que faz que a radiação proveniente do interior não consiga se difundir através delas. Em consequência as camadas mais externas do Sol, chamadas de *envoltória*, entram num estado de convecção parecido com o de uma chaleira em ebulição. É desta forma que a energia, que havia sido transportada pela radiação até a base destas camadas, é finalmente transmitida para a superfície.

As estrelas da sequência principal com massas menores que a massa do Sol possuem envoltórias convectivas profundas. Por outro lado, as estrelas da sequência principal com massas maiores que $2M_{\odot}$ não tem envoltórias convectivas: a opacidade não é tão grande assim, e a radiação pode se difundir até a superfície da estrela. Estas estrelas contudo possuem “caroços” convectivos, isto é, uma região em torno do seu centro, onde ocorrem correntes de convecção. Nessas estrelas a energia nuclear é produzida numa região central muito pequena, de modo que o fluxo de energia aí é muito grande e a radiação, sozinha, não consegue dar conta do seu transporte: por isso é que ali se estabelecem movimentos convectivos no gás.

A música das estrelas rivaliza com a das baleias. O seu interior é uma sinfonia de sons, reverberando fragores e trovões e sibilando agudos lamentos. Ninguém disse para a estrela qual o tamanho e forma que deveria ter, qual deveria ser a sua temperatura,

¹¹ O gás interior das estrelas é tão quente que seus átomos encontram-se *ionizados*, isto é, os seus elétrons encontram-se separados – livres – dos respectivos núcleos.

quanto deveria brilhar, ou como ela poderia compensar a energia que escapa continuamente da sua superfície. São as ondas acústicas que, percorrendo a estrela em aproximadamente 1 hora, fazem com que as várias partes da estrela se comuniquem umas com as outras, permitindo que ela encontre, a todo momento, o estado de equilíbrio mais apropriado e natural. A estrela se reajusta vibrando em vários modos de baixa frequência. Na outra ponta da escala sonora, umas 60 oitavas acima, o sibilar das partículas de alta velocidade, se encontrando e empurrando umas às outras, produzem ondas que atravessam apenas pequenas distâncias. Não bastasse essa imensa orquestração de sons, a estrela também funciona como um enorme alto-falante. Como a densidade de matéria decresce do centro para fora, as ondas sonoras, à medida que se propagam, aumentam de amplitude e, portanto, de intensidade. Desta forma, chega à superfície da estrela uma torrente de ondas sonoras amplificadas que, passando através dela, acaba se dissipando nas camadas atmosféricas da estrela. No caso do Sol, que tem a sua envoltória convectiva como fonte de ondas sonoras, o contínuo bombeamento de energia através de ondas acústicas ajuda a manter a *coroa* a temperaturas da ordem um milhão de graus Kelvin. A *coroa solar*, normalmente vista durante os eclipses, é a camada mais alta da atmosfera da Sol: ela é tão rarefeita que é incapaz de se livrar de toda a energia que recebe na forma de radiação. Então, sua única saída é expandir-se e expulsar o excesso de energia. Desta maneira a alta atmosfera do Sol parece com um gigantesco motor a jato: o seu combustível é o gás das camadas inferiores que, aquecido pelas ondas acústicas, é expulso em alta velocidade. Este fluxo de matéria em expansão para fora do Sol é o chamado *vento solar*, capaz de retirar do Sol algo como 100 toneladas de massa por segundo. Este fenômeno não é exclusivo do Sol: outras estrelas também têm seus *ventos estelares*, algumas vezes muito mais intensos que os do Sol – tão mais intensos que podemos dizer que algumas estrelas estão literalmente desaparecendo, evaporando-se em escalas de tempo de não mais que alguns milhões de anos.

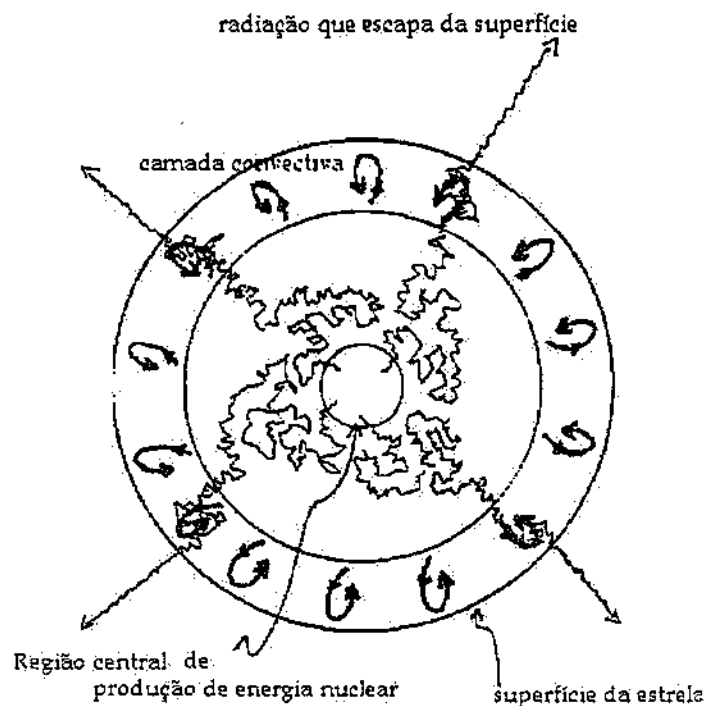


FIGURA 4.3 - ESTA FIGURA ILUSTRA COMO OS FÓTONS DE RADIAÇÃO SE DIFUNDEM ATRAVÉS DE UMA ESTRELA COMO O SOL. NO CASO DO SOL, O TEMPO QUE A RADIAÇÃO LEVA PARA SE DIFUNDIR DESDE O CENTRO ATÉ A BASE DA ENVOLTÓRIA CONVECTIVA É DA ORDEM DE 10 MILHÕES DE ANOS. QUER DIZER, SE POR ACASO A PRODUÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR NO SOL CESSASSE ABRUPTAMENTE, NÓS SÓ PERCEBERÍAMOS QUE ALGO DE IMPORTANTE ACONTECEU, 10 MILHÕES DE ANOS DEPOIS !

4.4 A GERAÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR NAS ESTRELAS

As estrelas são imensos reatores atômicos que geram energia nuclear. A luz do Sol que nos alimenta é produzida no interior profundo do Sol. Para entender isto vamos precisar nos deter um pouco e examinar como a energia nuclear é gerada nas estrelas.

4.4.1 OS NÚCLEOS ATÔMICOS

Os átomos se combinam entre si para formar as moléculas. As moléculas se mantêm coesas, graças às *forças elétricas* que resultam dos átomos que as compõem, ao compartilharem ou trocarem os seus elétrons mais externos. Estas forças elétricas moleculares não são muito fortes, quando comparadas com as forças nucleares. Assim, se fizermos um rearranjo dos átomos numa molécula, ou se a quebrarmos, o resultado será uma liberação relativamente pequena de energia *química*. A energia química é a forma de energia mais utilizada pela humanidade, por exemplo queimando petróleo ou carvão.

Todos os átomos têm um pequeno núcleo, que é carregado positivamente, rodeado por uma nuvem comparativamente grande de elétrons. O núcleo propriamente é constituído por partículas conhecidas por *núcleons*, que tanto podem ser prótons, que são carregados positivamente, ou neutrons, que não têm carga elétrica. Estes núcleons são mantidos coesos no núcleo, graças a uma outra força, que só ocorre entre núcleons, denominada força ou *interação forte* que é, comparativamente, muito mais forte do que as forças elétricas. Além disso, quando promovemos um rearranjo ou a quebra de um núcleo, podemos, dependendo do núcleo, ter uma liberação ou uma absorção de energia *nuclear*, que é, em geral, milhões de vezes maior que a energia química ordinária.

Imaginemos que dispomos de um reservatório de núcleons livres – prótons e neutrons - os quais possamos combinar e juntar de diferentes maneiras, de modo a produzir os elementos químicos da tabela periódica ¹². Sempre que um núcleo atômico, qualquer que seja, for construído a partir dos seus núcleons individuais, ocorre uma *liberação* de energia. Isto ocorre porque os núcleons sempre se atraem entre si, através da força forte. A energia que é liberada na formação do núcleo a partir dos seus componentes individuais é chamada de *energia de ligação* do núcleo.

Todas as coisas são coesas por algum tipo de energia de ligação de algum tipo. Por exemplo, uma pedra está presa à Terra através da força de gravidade: a sua energia de

¹² Aliás, este era o sonho dos alquimistas da Idade Média.

ligação (à Terra) é a quantidade de energia que seria liberada se a mesma pedra caísse na Terra, vinda do espaço. Neste caso, a força de atração é a força gravitacional. No caso das moléculas, a força atrativa é a força elétrica. Por outro lado, se quisermos “desmontar” um objeto nos seus componentes individuais, iremos precisar *gastar* energia, numa quantidade exatamente igual à sua energia de ligação.

Será mais conveniente agora pensarmos na *energia de ligação por núcleon*, que é calculada simplesmente dividindo a energia de ligação total do núcleo pelo número de núcleons que ele dispõe. A Figura 4.4 mostra como varia a energia de ligação por núcleon dos elementos químicos, em função do seu *número de massa*, que é igual ao seu número total de núcleons (simbolizado por A). Como se pode ver, ela primeiro aumenta até atingir o valor máximo, quando $A = 56$, o que corresponde ao núcleo do Ferro, e depois diminui para os núcleos mais pesados, de número de massa maior.

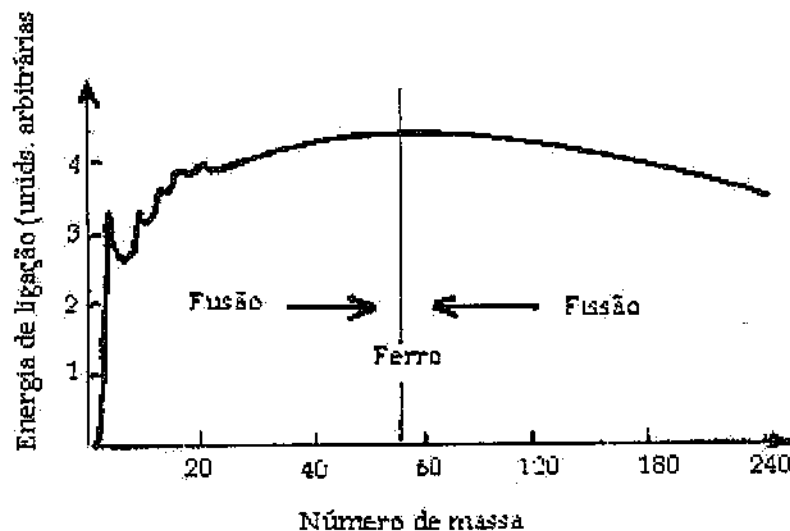


FIGURA 4.4 - A CURVA DA ENERGIA DE LIGAÇÃO DOS DIFERENTES NÚCLEOS ATÔMICOS. A ENERGIA DE LIGAÇÃO MÁXIMA, POR NÚCLEON, OCORRE PARA NÚCLEOS NA REGIÃO DO NÚCLEO DO FERRO ($A = 56$).

Assim, se dispusermos de 224 núcleons livres, então teremos mais energia liberada construindo 4 núcleons de Ferro do que construindo um único núcleo do elemento

químico Rádio, de número de massa $A=224$.

4.4.2 FUSÃO OU FISSÃO ?

Na verdade, é praticamente impossível dispor de núcleons livres como nas experiências imaginárias que fizemos na secção anterior. Os prótons são fáceis de encontrar, pois eles são os núcleos dos átomos de Hidrogênio, o elemento mais abundante do Universo. Mas os neutrons são muitíssimo raros: quando ficam livres eles *decaem*, isto é, transformam-se em outras partículas, muito rapidamente. Assim, se realmente quisermos brincar de alquimistas precisaremos utilizar os núcleos já existentes e a partir deles construir os outros. Podemos juntá-los, e então teremos um processo de *fusão nuclear*, ou quebrá-los em núcleos menores, no processo de *fissão nuclear*. No entanto, embora o objetivo dos alquimistas fosse a transmutação dos elementos, o objetivo da estrela é obter energia nuclear suficiente para compensar as suas perdas. Isto só pode ser realizado quando o núcleo final tem energia de ligação maior que os núcleos iniciais. Olhando para a Figura 4.4, vemos que para aumentar a energia de ligação é necessário sempre caminhar em direção ao pico do Ferro. Assim, se estivermos à esquerda, isto é, se dispuzermos unicamente de núcleos de elementos mais leves que o Ferro, obteremos energia pela fusão de núcleos leves em núcleos mais pesados: é assim que as estrelas obtêm sua energia nuclear. Por outro lado, se estivermos à direita, teremos energia pela fissão de núcleos pesados em núcleos mais leves: esta é a maneira pela qual a Humanidade obtém energia nos reatores nucleares.

As estrelas da sequência principal obtêm sua energia pela fusão de 4 núcleos de Hidrogênio, isto é, 4 prótons, formando 1 núcleo de Hélio. Todavia, a massa de 1 núcleo de Hélio é cerca de 1% menor que a soma das massas de 4 prótons! Isto acontece porque a energia e a massa são equivalentes, de modo que a energia liberada no processo de fusão equivale a uma perda de massa, a qual é igual a uma pequena fração da massa original dos 4 prótons. Na verdade, qualquer forma de energia equivale a uma massa: por exemplo, uma chaleira de água quando aquecida até o ponto de ebulição pesa um bilionésimo de grama a mais do que quando a água está fria, porque o calor é uma forma

de energia e portanto tem massa¹³. Segundo a famosa fórmula de Einstein, a equivalência da energia com a massa se expressa assim:

$$\text{Energia} = \text{Massa} \times c^2$$

onde c simboliza a velocidade da luz. Assim, poderíamos, em princípio, transformar 1 tonelada de matéria em energia: isto supriria a humanidade de energia por pelo menos 1 ano... O Sol produz energia consumindo sua massa a uma taxa de 4 milhões de toneladas por segundo.

As estrelas da sequência principal produzem sua energia pela queima do Hidrogênio e a sua lenta transmutação em Hélio. A energia é produzida na região central da estrela, onde a temperatura e a densidade são mais altas, e então lentamente é transportada para a sua superfície. Isto no leva à seguinte questão: Por que a energia é liberada tão lentamente? Por que as estrelas não explodem, liberando instantaneamente uma imensa quantidade de energia nuclear?

4.4.3 O EFEITO TÚNEL

Há dois fatores que impedem que as reações de fusão dos prótons sejam mais rápidas. Uma delas é a chamada *barreira coulombiana*, que acontece porque os prótons têm carga de mesmo sinal e, portanto, se repelem. A repulsão elétrica age como uma barreira, que é por isso adjetivada como “coulombiana”¹⁴. Quando dois prótons entram em colisão direta, a distância mínima que atingem antes de se repelirem depende da velocidade que tinham: quanto mais rápidos mais próximo irão estar antes de começarem a se afastar devido à repulsão elétrica. Para atingir a distância mínima necessária para iniciar a reação de fusão, os prótons necessitariam ter velocidades da ordem de 10.000 km/s. No entanto, a velocidade média dos prótons no centro do Sol é de apenas 500km/s e, na verdade, em todo o Sol não devemos encontrar nenhum próton com velocidade tão alta! Como, então, é possível que os lentos prótons solares

¹³ Se você decidir fazer esta medida, não esqueça de fechar hermeticamente a sua chaleira: qualquer molécula de vapor d'água que escapar irá falsear o resultado!

¹⁴ O nome vem da lei de Coulomb, que dá a força de atração ou repulsão que ocorre entre as cargas elétricas.

ultrapassem a barreira coulombiana? Isto acontece graças a um fenômeno denominado *efeito túnel*, pelo qual existe efetivamente a possibilidade de que um próton atravesse “incólume” uma barreira coulombiana, não importando qual velocidade tenha. A probabilidade que isto ocorra – cujo valor depende da velocidade do próton – pode ser calculada a partir das regras da *Mecânica Quântica*, a única teoria física capaz de descrever corretamente o mundo das partículas atômicas e subatômicas. No centro do Sol, levando em conta que a velocidade média dos prótons é de 500km/s e que existem prótons com velocidades maiores e menores que a média, a probabilidade de penetração da barreira coulombiana é de aproximadamente 10^{-9} , quer dizer, uma chance de penetração, por efeito túnel, em 1 trilhão (10^9) de colisões diretas entre dois prótons. Considerando que no centro do Sol devem ocorrer aproximadamente 10^9 colisões diretas por segundo, então vê-se que, em média, a cada segundo 1 próton é capaz de penetrar a barreira coulombiana e encontrar-se face a face com outro próton. Mas isso não é tudo.

4.4.4 INTERAÇÕES FRACAS

Existe um segundo obstáculo para a ocorrência da fusão do Hélio: é o fato de que neutrons livres são raríssimos na natureza. Aonde obtê-los? Na verdade podemos obtê-los fazendo uso da 4ª força da natureza, a chamada *interação fraca*. Através dela pode-se obter a transmutação de um próton num neutron, o que sempre acontece com a emissão de um *pósitron* (que é um elétron de carga positiva e é a antipartícula do elétron normal, negativo) e de uma outra partícula chamada *neutrino*, que tem massa nula e viaja à velocidade da luz.¹⁵ Este processo de transmutação de prótons chama-se *decaimento beta*. O problema é que o decaimento beta é um processo muitíssimo lento. É tão lento que, em média, apenas 1 vez a cada 10 bilhões de anos iremos ver dois prótons se encontrando cara a cara e reagindo violentamente e liberando energia a medida que um deles se transforma num neutron e ambos se transformam num núcleo de *deutério*, o Hidrogênio pesado. Mas, uma vez formado o deutério, todo o resto se passa rapidamente. Logo o deutério se combina com outro próton, formando o núcleo de

¹⁵ Acredita-se que a massa do neutrino seja nula, mas seu valor real ainda não é bem conhecido.

Hélio-3 (2 prótons e 1 neutron) e liberando ainda mais energia. Os núcleos de Hélio-3 então combinam-se rapidamente entre si para formar um núcleo de Hélio-4, o núcleo dos átomos de Hélio normalmente encontrados.

Esta sucessão de reações, nas quais 4 prótons se combinam para formar um núcleo de Hélio-4, é conhecida como *queima do hidrogênio* ou *ciclo p-p*, e pode ser esquematizada como abaixo:

próton + próton $\Rightarrow$ D + e^+ + neutrino

H^2 + próton $\Rightarrow$ He³

He³ + He³ $\Rightarrow$ He⁴ + próton + próton

Onde D (ou H^2) representa o núcleo de Deutério; He³, o de Hélio-3; He⁴, o de Hélio-4 e e^+ , o *pósitron*¹⁶

4.5 O NASCIMENTO DAS ESTRELAS

4.5.1 AS NUENS INTERESTELARES: BERÇÁRIO DAS ESTRELAS

A maioria das estrelas da nossa Galáxia foram formadas há muito tempo. Apesar disso muitas estrelas são ainda jovens e novas estrelas também estão se formando, como podemos observar na nebulosa de Orion, por exemplo. As novas estrelas nascem nas grandes nuvens de gás e poeira - nuvens escuras - que se espalham pelo meio interestelar. Estas nuvens são formadas por mais de 80% de Hidrogênio (na forma molecular, H_2), uns 18% de Hélio e umas "pitadinhas" - 1% a 2% - de elementos mais pesados.

Estas nuvens, também chamadas *nuvens moleculares*, são imensas: várias centenas de parsecs, chegando a mil anos-luz. Elas contêm grande quantidade de massa, de centenas a milhares de vezes a massa do Sol. Algo como 10% de toda a massa da nossa Galáxia está na forma de nuvens moleculares: uma massa equivalente a 10 bilhões de sóis. Se

todas elas fossem convertidas em estrelas, a nossa Galáxia seria provavelmente uma das mais brilhantes (e nós, na Terra, morreríamos torrados com a imensa radiação proveniente das estrelas...

Felizmente, em condições normais, as nuvens moleculares não são muito produtivas. A maioria delas passa milhares de anos sem atividade alguma. Na Galáxia inteira nascem menos de uma dezena de estrelas por ano!

A maioria das estrelas jovens da Galáxia encontram-se próximas de seus locais de nascimento e ainda estão envolvidas pelos restos das nuvens que lhes deram origem. Muitas vezes vemos centenas de jovens estrelas reunidas em aglomerações, chamadas de *associações O,B*¹⁷. Um exemplo são as Plêiades, mostrada na Figura 4.5 abaixo (As Plêiades são também conhecidas entre nós como os 7 “estrelas” ou *cyiuce*, em língua tupi). Em casos como este, fica claro que as estrelas nasceram mais ou menos ao mesmo tempo, de uma mesma nuvem interestelar.

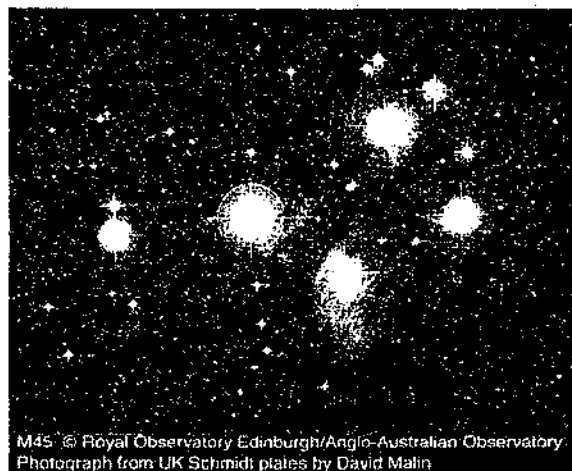


FIGURA 4.5 - AS ESTRELAS DAS PLÊIADES NASCERAM APROXIMADAMENTE HÁ 60 MILHÕES DE ANOS ATRÁS E AINDA ESTÃO “VESTIDAS” COM OS RESTOS DE SUA NUVEM-MÃE.

¹⁶ uma partícula “inimiga” do nosso familiar elétron, o e^- : quando os dois se encontram eles se auto-aniquilam, produzindo radiação eletromagnética - radiação γ

¹⁷ As estrelas jovens de massas muito maiores que o Sol são sempre quentes: estão situadas na parte superior do ramo da sequência principal do diagrama HR. Os astrônomos classificam as estrelas mais quentes como *tipo O*, em seguida vem as do *tipo B*. Na sequência de temperaturas temos os tipos *A*, *F*, *G*, *K* e *M*. O Sol, pela sua temperatura, é uma estrela tipo *G*. Confira isto na figura do diagrama HR apresentada antes.

4.5.2 POR QUE NASCEM AS ESTRELAS ?

As grandes nuvens moleculares geram estrelas no seu interior por causa de um fenômeno conhecido como *instabilidade gravitacional*. Num certo sentido, a instabilidade gravitacional pode ser entendida como o inverso do equilíbrio hidrostático que prevalece nas estrelas. Naquele caso, como vimos, o peso de uma camada é equilibrado pela diferença das pressões nos dois lados da camada. Se, por alguma razão, o peso da camada superar a diferença de pressões, teremos o início de um movimento de contração que pode se transformar num colapso, isto é, todas as camadas se precipitam em direção a um centro ao mesmo tempo. Forma-se um coágulo de gás mais denso e quente no interior da nuvem: é a *proto-estrela*. À medida que a contração se desenvolve, a temperatura interna do coágulo aumenta até que, em algum momento, as condições de densidade e temperatura tornam-se favoráveis ao início da fusão do Hélio e a consequente produção de energia nuclear. Assim nascem as estrelas. As grandes nuvens interestelares são muito frias, algo como 10 °K a 100 °K, isto é, menos que -200 °C ! Por outro lado elas são também muito pouco densas: menos que 10^{-22} gramas/cm³, correspondente a algumas dezenas de átomos por cm³. Sendo assim tão pouco densas, elas facilmente encontram o equilíbrio hidrostático, apesar das baixíssimas pressões internas. Na verdade, não é raro encontrarmos nuvens moleculares em expansão: quer dizer, suas pressões internas são maiores que as forças de gravitação ¹⁸ !

Como podemos ver, a situação das nuvens moleculares não é em nada propícia à geração de estrelas no seu interior. Isto talvez explique a sua baixa produtividade. Como, então, nascem as estrelas ? Ocorre que as nuvens sofrem também a ação de outros fatores, externos e internos a elas, capazes de comprimi-las localmente, aumentando a densidade local e assim provocando instabilidades gravitacionais locais. O principal fator externo são os braços espirais da Galáxia, que é o fator mais importante, pois é ele que dá início ao processo; o principal fator interno são as explosões das estrelas mais jovens e maior massa (estas estrelas em explosão são as

¹⁸ Para se ter uma idéia do-quão rarefeitas são estas nuvens, a densidade de partículas na atmosfera terrestre, a uma altura de 50km, é algo em torno de 10^{16} átomos por cm³, 100 trilhões de vezes superior! Como elas são tão rarefeitas, sua opacidade é praticamente nula (mas, então, por que são escuras ?)

chamadas estrelas *Supernovas*), formadas no interior da própria nuvem e que fazem com que o processo de formação estelar se propague por toda a nuvem, como um incêndio numa floresta seca.

4.5.3 A VIDA DAS PROTO-ESTRELAS

Assim, por causa da instabilidade gravitacional induzida por causas externas ou internas, a nuvem entra num processo de coagulação generalizado - é a *fragmentação* da nuvem. Como a nuvem normalmente tem movimentos internos - uma *turbulência* interna - os coágulos, além da contração, apresentam também um movimento de rotação. No início, os coágulos são mais ou menos esféricos. Mas, à medida que se contraem, passam a girar cada vez mais rapidamente e, então, lentamente começam a se achatar, tornando-se oblatos. A região central, que tem que suportar o peso de todo o resto do coágulo, acaba se contraindo mais rapidamente, tornando-se mais densa e quente: é o *caroço* do coágulo.

Nas regiões externas ao caroço, que vão se tornando progressivamente mais achatadas por causa da rotação, o gás mantém-se moderadamente frio. Nesta região parte dos elementos mais pesados que o Hidrogênio e o Hélio começam a se combinar, formando microscópicos grãos de poeira. Estes, à medida que colidem uns com os outros, acabam se aglutinando em pequenas pedrinhas de rocha meteorítica e gelo que mais tarde darão origem a meteoroides e planetézimos e, mais adiante, formarão os planetas. Tal deve ter sido o processo de formação do nosso Sistema Solar e assim deve ocorrer na maioria das estrelas.

Enquanto isso, o caroço do nosso coágulo continua seu processo de contração, tornando-se denso e quente e se aproximando do estágio final. É a estrela primitiva, ainda envolta por uma grande quantidade de gás e poeira. Neste momento ela descobre que queimando o Hidrogênio em Hélio terá acesso a um imenso reservatório de energia. A estrela entra então num estado convulsivo, à procura da melhor estrutura interna de equilíbrio capaz de ajustar a sua taxa de produção de energia à energia que expulsa pela sua superfície na forma de radiação: ela torna-se uma estrela variável irregular do *tipo*

*T-Tauri*¹⁹. Neste estado convulsivo, com profundas zonas de convecção desde a superfície, a estrela primitiva passa a produzir um intenso vento estelar que, ao final, acaba por varrer de volta para o meio interestelar todo o material que a envolvia (e possivelmente boa parte da atmosfera dos planetas mais próximos dela...).

Quando, finalmente, encontra a sua melhor estrutura interna a estrela entra num estado quiescente de queima do Hidrogênio em Hélio, o qual pode durar bilhões de anos: agora ela é uma estrela da sequência principal.

4.6 VIDA E MORTE DAS ESTRELAS

4.6.1 A ESTRELA ESGOTA O SEU RESERVATÓRIO DE HIDROGÊNIO

O que irá acontecer com uma estrela da sequência principal após esgotarem todo o seu Hidrogênio central, dependerá da massa que ela que ela tiver. De maneira geral, as estrelas evoluem tanto mais rapidamente quanto maior for a sua massa. As estrelas de massa menor que o Sol, levam muito tempo para fazer isto, mais do que os 10 bilhões de anos, que é a idade da Galáxia. Sobre estas estrelas, só podemos tentar predizer o seu futuro, já que todas elas, mesmo as que nasceram nos primórdios da vida da Galáxia, ainda se mantêm na sequência principal. As estrelas de massa maior que o Sol, no entanto, evoluem mais rapidamente.

Depois que a estrela consome todo o seu suprimento de Hidrogênio central, ela deixa a sequência principal e começa a se mover, no diagrama HR, em direção à região das estrelas *gigantes vermelhas*. A região central agora é constituída quase que inteiramente de Hélio e não produz mais energia alguma. No entanto a estrela continua irradiando energia pela sua superfície. A maior parte desta energia está acumulada na região central, o *caroço* da estrela. Ele perde energia, esfria-se e começa a se contrair,

¹⁹ A estrela T Tauri, da constelação do Touro, é uma estrela de variabilidade irregular que está envolta numa densa nuvem de gás e poeira. Acredita-se que seja uma estrela jovem, que está ingressando da sequência principal. Estrelas em estágio semelhantes são, por extensão, nomeadas como sendo *do tipo T-Tauri*.

aumentando a sua temperatura e densidade e liberando energia gravitacional²⁰, parte da qual irá se converter em calor no resto da estrela. Duas coisas então vão acontecer.

Primeiro, o Hidrogênio que está logo acima do caroço central de Hélio vai começar a queimar. Forma-se uma camada de queima de Hidrogênio e esta queima irá progressivamente aumentar o tamanho e a massa do caroço de Hélio. Segundo, a outra parte da energia gravitacional liberada, além da energia nuclear produzida na camada de queima do Hidrogênio, irá aquecer as partes externas da estrela - a sua *envoltória* - a qual começará a se expandir. A estrela aumenta o seu brilho e se torna, de fato, uma gigante vermelha.

4.6.2 A VELHICE

A partir do momento que a estrela deixa a sequência principal, é sinal que ela está entrando na sua “3ª idade”. Ela tem, comparativamente, pouco tempo de vida. Ela percebe, tardiamente, que a vida na sequência principal era por demais calma e sedentária e decide que terá, ao menos, um final glorioso. Infelizmente, não lhe resta muito combustível nuclear. Agora tudo que pode fazer é tentar queimar o Hélio que ainda lhe sobrou, e proceder a fusão paulatina de todos os elementos, passo a passo, até o Níquel e o Ferro. A cada passo, maiores densidades e temperaturas centrais são requeridas e o restante do combustível nuclear é queimado de forma cada vez mais rápida.

4.6.3 GIGANTES VERMELHAS E ANÃS BRANCAS

Vamos começar considerando as estrelas de massa menor que 2 massas solares. Elas terminam sua vida como anãs brancas. Durante sua fase gigante vermelha, estas estrelas continuam a contrair o seu caroço central até que a sua temperatura e densidade sejam suficientemente altas para iniciar a queima do Hélio em Carbono. Enquanto isto não

²⁰ Como liberar energia gravitacional? Um experimento simples: amarre uma corda num peso e deixe-o pendurado entre os dedos da sua mão. Agora afrouxe as mãos, deixando o peso cair de forma que a corda deslize entre os seus dedos. Eles vão esquentar; este calor produzido é resultado da conversão da energia gravitacional liberada ao cair o peso (cuidado para não se queimar!!!).

acontece, a gigante vermelha continua a aumentar o seu brilho. No diagrama HR ela segue uma trajetória praticamente vertical. A ignição do Hélio ocorre quando a temperatura central chega aos 100 milhões de graus (10^8 °K). Ela acontece de repente: é o chamado *flash do Hélio*. O caroço central se expande subitamente e a luminosidade da estrela diminui até se estabilizar várias ordens de grandeza abaixo, enquanto o Hélio passa a ser queimado de maneira quiescente.

Nesta fase, ou mesmo antes do flash do Hélio, as estrelas produzem ventos intensos e perdem boa parte de suas envoltórias, deixando expostos seus caroços brilhantes. Quando o Hélio central é esgotado acaba a produção de energia nuclear e o caroço se contrai até se tornar uma anã branca. Neste ponto a estrela é constituída por uma envoltória de material ejetado, chamada *nebulosa planetária* e, mais ou menos no centro da nebulosa, uma estrela anã branca, de tamanho comparável ao da Terra, esfriando lentamente (cf. Figura 4.6).

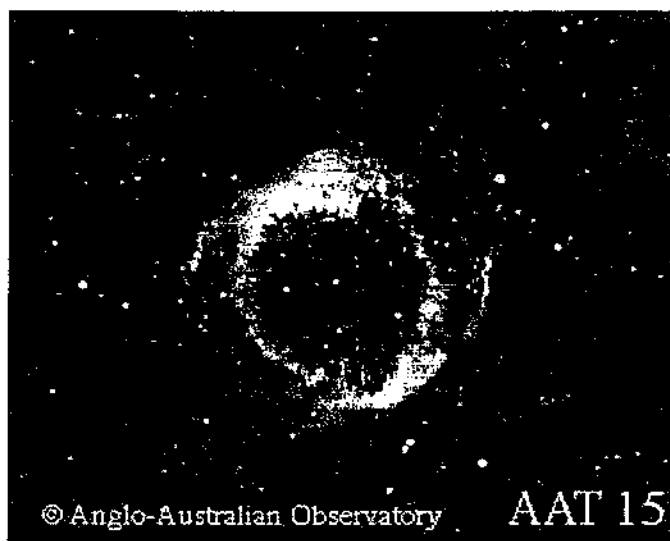


FIGURA 4.6 - NEBULOSA PLANETARIA. ESTA É A NEBULOSA DA HÉLICE, A MAIS PRÓXIMA DE TODAS AS NEBULOSAS PLANETARIAS (450 ANOS-LUZ). A PEQUENA ESTRELA CENTRAL É O CAROÇO BRILHANTE DA ESTRELA CUJA ENVOLTÓRIA, HOJE, CONSTITUE A NEBULOSA.

Dentro de uns 5 bilhões de anos, o nosso Sol também irá se tornar uma anã branca. Apenas uma luz pálida irá brilhar no nosso gelado planeta, por vários bilhões de anos.

4.6.4 AS SUPERNOVAS

Vamos, agora, considerar o caso das estrelas de maiores massas, situadas na parte superior da sequência principal. Elas rapidamente liquidam com o seu reservatório central de Hidrogênio e deixam a sequência principal em poucas dezenas de milhões de anos. Então, elas se tornam gigantes vermelhas monstruosamente grandes (chamadas de *Super-Gigantes* vermelhas), com o caroço de Hélio rodeado por uma camada onde queima o Hidrogênio. À medida que o caroço se contrai, o Hélio começa a queimar, transformando-se em Carbono e Oxigênio. Logo a estrela passa a ter um caroço inerte de Carbono e Oxigênio, rodeado por uma camada de queima de Hélio, que por sua vez é rodeada por uma camada de queima de Hidrogênio. Passando o estágio de gigante vermelha, a estrela torna-se ainda mais luminosa, sofrendo agora de episódios de pulsação e de ejeção de gás a altas velocidades. Neste estágio, estas estrelas são por vezes denominadas *estrelas Wolf-Rayet*.

O caroço inerte de Carbono e Oxigênio passa então a se contrair na busca de novas fontes de energia nuclear. Quando a temperatura central atinge a casa dos 3 bilhões de graus e a densidade se aproxima dos milhões de gramas/cm³, o Carbono e o Oxigênio passam a queimar progressivamente em Neonio, Magnésio, Silício, Fósforo, Enxofre, e assim por diante, até o Níquel e o Ferro. No entanto, a energia nuclear liberada por esta multitude de reações é comparativamente pequena e é logo irradiada pela superfície da estrela.

Durante este estágio da estrela ocorrem outras perdas de energia, além daquela na forma de radiação eletromagnética. Hordas de neutrinos, produzidos nas próprias reações nucleares, e também pelo gás que se encontra a altíssimas temperaturas, propagam-se pela estrela livremente, sem nenhuma interação com a matéria. A luminosidade em neutrinos produzidos no interior do caroço aumenta tanto que chega a exceder a luminosidade da estrela na forma de radiação. Chegado este ponto, a única reserva de energia que sobra para a estrela é sua energia gravitacional. Para compensar as perdas cada vez maiores de energia, o caroço tem que contrair cada vez mais rápido. A densidade e temperaturas centrais vão aos píncaros e aí acontece o pior: o caroço

começa a perder mais energia porque passa a produzir os elementos mais pesados que o Ferro (veja a Figura 4.4 para entender porque).

A estrela está, agora, a uns poucos segundos de sua morte. As densidades são tão altas que os neutrinos já não conseguem escapar facilmente. Eles transportam energia do caroço para a envoltória que se aquece cada vez mais, até ao ponto em que reações nucleares começam a ocorrer no próprio manto estelar. O caroço em contração livre colapsa inteiramente, provocando a fissão de todos os elementos pesados, que se desintegram de volta em núcleos de Hélio. O vento de neutrinos se intensifica e se torna uma onda de choque que varre o manto estelar, explodindo no espaço. Nos últimos momentos do caroço em implosão, os próprios núcleos de Hélio são desintegrados em prótons e nêutrons: agora, toda a energia que a estrela irradiou durante os bilhões de anos que esteve na sequência principal deve ser imediatamente devolvida. O caroço encontra esta energia através de um colapso ainda mais catastrófico. Os elétrons são espremidos contra os prótons e, juntos, transmutam-se em nêutrons²¹. O caroço colapsado, desvestido do seu manto explodido, emerge agora como uma *estrela de nêutrons* girando rapidamente. Esta explosão titânica, causada pela energia liberada na implosão do caroço e pela explosão do manto, resulta numa *Supernova*: por um curto período de tempo ela torna-se tão brilhante quanto todas as estrelas da Galáxia brilhando juntas. Se uma Supernova ocorresse a uma distância equivalente a Alfa Centauro, ela brilharia nos céus da Terra tanto quanto o Sol.

²¹ Esta reação é chamada *decaimento beta-inverso*, porque é o inverso do decaimento beta discutido anteriormente

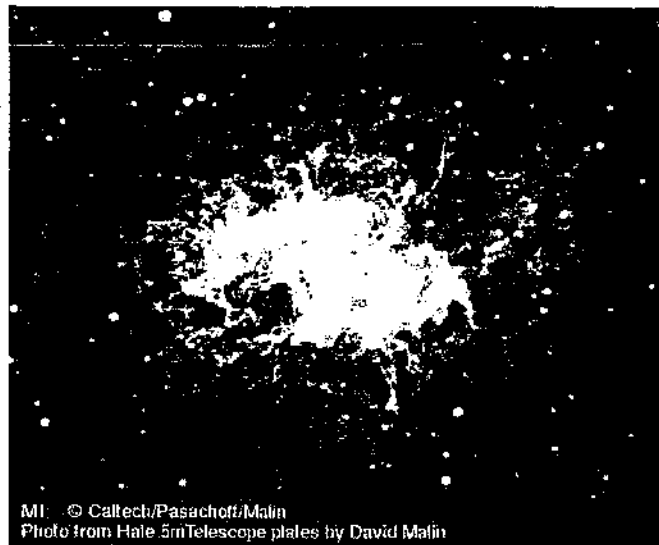


FIGURA 4.7 - A NEBULOSA DO CARANGUEJO NA CONSTELAÇÃO DO TOURO É UMA DAS FONTES MAIS INTENSAS EM ONDAS DE RADIO E TAMBÉM EM RAIOS-X E ULTRA-VIOLETA. A SUA LUMINOSIDADE TOTAL É 100.000 VEZES MAIOR QUE A LUMINOSIDADE DO SOL. ESTE IMENSA ENERGIA DA NEBULOSA VEM DO PULSAR QUE SE ENCONTRA NO SEU CENTRO. ESTA NEBULOSA É O RESTO DE UMA SUPERNOVA QUE EXPLODIU NO ANO DE 1054DC E QUE FOI REGISTRADA (A OLHO NU E DURANTE O DIA !!!) PELOS CHINESE E TAMBÉM PELOS ÍNDIOS NORTE-AMERICANOS.

4.6.5 ESTRELAS DE NEUTRONS E BURACOS NEGROS

Uma estrela de neutrons tem um raio pouco maior que 10km e densidade perto dos 1000 trilhões de gramas/cm³. Uma gotinha de matéria neutrônica pesaria na Terra milhões de toneladas. Uma estrela de neutrons possui campos magnéticos de 10¹² gauss - um trilhão de vezes mais intenso que o campo magnético da Terra - e começa sua vida girando rapidamente, a centenas de voltas por segundo. Ela é um *pulsar*.

Das cinzas da estrela morta uma nova estrela nasce, uma estrela que envia através do espaço uma mensagem pulsada que chega aos confins da Galáxia. Por milhões de anos, pulsando cada vez mais lentamente, o pulsar irradia a sua energia rotacional.

As estrelas de neutrons nunca têm massas maiores que 3 massas solares. Isto acontece porque a matéria neutrônica não é capaz de suportar forças gravitacionais produzidas por massas maiores que este valor. Por isso a implosão dos caroços centrais das estrelas de grande massa nem sempre resultam em estrelas de neutrons. Se sua massa for maior que este valor crítico, a implosão continua até produzir um *buraco negro*. Não iremos discutir estes objetos tão intrigantes, apenas comentar que eles possuem campos gravitacionais extremamente intensos. O espaço-tempo no seu entorno é completamente encurvado e, embora a matéria possa ser atraída por ele, dele nunca poderá escapar.

4.7 BIBLIOGRAFIA

Harrison, E.R. **Cosmology**: the science of the Universe. Cambridge Univ. Press, 1981.

Este texto inspirou boa parte destas notas.

Hartmann, W.K. **Astronomy**: the cosmic journey. Belmont: Wadsworth, 1989.

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

Capítulo 5

COSMOLOGIA

Carlos Alexandre Wuensche^{*}

^{*} e-mail: alex@das.inpe.br

COSMOLOGIA

LISTA DE FIGURAS.....	5-5
LISTA DE TABELAS	5-11
5.1 INTRODUÇÃO.....	5-13
5.1.1 UMA PERSPECTIVA HISTÓRICA.....	5-13
5.1.2 O QUE É COSMOLOGIA?.....	5-15
5.1.3 QUAIS PROBLEMAS A COSMOLOGIA SE PROPÕE A RESOLVER?	5-17
5.2 GALÁXIAS: NOSSA VIZINHANÇA CÔSMICA.....	5-19
5.2.1 A ESTRUTURA DA NOSSA GALÁXIA	5-20
5.2.2 AS FORMAS CONHECIDAS: ESPIRAIS, ELÍPTICAS E IRREGULARES.....	5-22
5.2.3 A FORMAÇÃO DAS GALÁXIAS	5-26
5.2.4 RADIOGALÁXIAS E QUÁSARES	5-27
5.3 A ESCALA DE DISTÂNCIA COSMOLÓGICA	5-27
5.3.1 HIERARQUIAS	5-27
5.3.2 DISTÂNCIAS TÍPICAS E A LEI DE HUBBLE	5-27

5.4.1	UM QUADRO CÓSMICO.....	48
5.4.2	O MODELO COSMOLÓGICO PADRÃO: O BIG BANG.....	51
5.4.3	ESTRUTURA E EVOLUÇÃO.....	55
5.5	O SUPORTE OBSERVACIONAL DO BIG BANG.....	57
5.5.1	AS ESTRUTURAS EM GRANDE ESCALA.....	57
5.5.2	A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO EM MICROONDAS.....	61
5.5.3	A NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL E A QUÍMICA DO UNIVERSO.....	65
5.6	O FUTURO DO UNIVERSO.....	67
5.7	CONCLUSÃO.....	70
5.8	SUGESTÕES DE LEITURA.....	72
5.9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 5.1 - ESPECTRO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA, DE RAIOS GAMA ATÉ ONDAS LONGAS DE RÁDIO. NA FAIXA INFERIOR DA FIGURA, AS REGIÕES DE ABSORÇÃO DE RADIAÇÃO ESTÃO MARCADAS EM CINZA. NA REGIÃO DE CORTE DO INFRAVERMELHO, VÁRIAS BANDAS AINDA SÃO VISÍVEIS DO SOLO (ENTRE 10^{-6} E 10^{-4} CM) A FAIXA SUPERIOR MOSTRA AS FAIXAS DE RADIAÇÃO ACESSÍVEIS A OBSERVAÇÕES A BORDO DE SATÉLITES OU FOGUETES, ACIMA DA ATMOSFERA..... 5-17**
- FIGURA 5.2 - ESTRUTURA DA NOSSA GALÁXIA, COM O DISCO REPRESENTADO EM PRETO E A PARTE DO HALO COBERTA PELOS AGLOMERADOS GLOBULARES. A DISTÂNCIA DO SISTEMA SOLAR AO CENTRO DA GALÁXIA ESTÁ MARCADA NA PARTE SUPERIOR DA FIGURA. 5-19**
- FIGURA 5.3 - EMISSÃO DE RÁDIO NO COMPRIMENTO DE ONDA DE 21 CM, PRODUZIDA POR HIDROGÊNIO NEUTRO, E USADA PARA MAPEAR OS BRAÇOS ESPIRAIS DA VIA LÁCTEA. 5-23**
- FIGURA 5.4 - PARTE CENTRAL DO AGLOMERADO DE VIRGEM. AS DUAS GALÁXIAS ELÍPTICAS GIGANTES NO CENTRO E EMBAIXO DA FIGURA SÃO, RESPECTIVAMENTE, M84 E M86 (FONTE: SHU, PÁG. 340)..... 5-24**
- FIGURA 5.5 - NEGATIVO DA FOTO DE MESSIER 101, UMA GALÁXIA ESPIRAL DO TIPO SCII, QUE VEM SENDO UM OBJETO IMPORTANTE NO DEBATE SOBRE AS ESCALAS DE DISTÂNCIA DO UNIVERSO (FONTE: SHU, PÁG. 268)..... 5-25**

FIGURA 5.6 - DIAGRAMA DE HUBBLE PARA A CLASSIFICAÇÃO DE GALÁXIAS REGULARES (FONTE: SHU, PÁG. 294).....	5-26
FIGURA 5.7 - EXEMPLOS (DE CIMA PARA BAIXO NO SENTIDO HORÁRIO) A) GALÁXIA ELÍPTICA, B) GALÁXIA ESPIRAL ORDINÁRIA, C) GALÁXIA ESPIRAL BARRADA E D) GALÁXIA IRREGULAR.	5-27
FIGURA 5.8 - DE CIMA PARA BAIXO, VEMOS UMA NUVEM DE GÁS EM EXPANSÃO; NO CENTRO A NUVEM COMEÇA A COLAPSAR SOB O EFEITO DA MATÉRIA CONCENTRADA NO SEU INTERIOR. EMBAIXO, ESTRELAS DE POPULAÇÃO II SÃO FORMADAS NO NÚCLEO. AS REGIÕES EXTERNAS DO GLOBO CAEM PARA O CENTRO E CRIAM UM DISCO DE GÁS EM ROTAÇÃO ONDE ESTRELAS DE POPULAÇÃO I IRÃO, FUTURAMENTE, SE FORMAR.....	5-27
FIGURA 5.9 - MAPA DE EMISSÃO SINCROTRON FEITO POR HASLAM E COLABORADORES. A FREQUÊNCIA DE OBSERVAÇÃO É 408 MHz E O PLANO DA GALÁXIA É A FAIXA INTENSA, NA FORMA DE CORCOVA, SITUADA AO LONGO DO MAPA..	5-27
FIGURA 5.10 - MAPA EM RÁDIO DE CIGNUS A, UMA RADIOFONTE CLÁSSICA. A IMAGEM CENTRAL (NA FORMA DE UMA PEQUENA BORBOLETA) REPRESENTA A REGIÃO EMISSORA NO ÓPTICO. AS DUAS ESTRUTURAS SIMÉTRICAS EM RELAÇÃO AO CENTRO SÃO OS CHAMADOS LOBOS EMISSORES E EMITEM UMA ENORME QUANTIDADE DE ENERGIA NA FAIXA DE RÁDIO. O TAMANHO TÍPICO DESSAS ESTRUTURAS EM RÁDIO É DA ORDEM DE ALGUNS MILHÕES DE ANOS-LUZ.	5-27

FIGURA 5.11 - RELAÇÃO REDSHIFT X DISTÂNCIA PARA DIVERSAS FONTES EXTRAGALÁCTICAS. AS FLECHAS À DIREITA INDICAM O DESLOCAMENTO DAS LINHAS H E K DO CÁLCIO (CORTESIA DO OBSERVATÓRIO PALOMAR).....	5-27
FIGURA 5.12 - IMAGEM À ESQUERDA: QUASAR 3C 273, OBSERVADO NO ÓPTICO. OBSERVE O JATO FRACO DE MATÉRIA SAINDO DA FONTE (PARTE INFERIOR DIREITA DA IMAGEM). À DIREITA, A MESMA FONTE MEDIDA EM RÁDIO, MOSTRANDO O NÚCLEO (ACIMA À ESQUERDA DA IMAGEM) E O FORTE JATO, COM O FORMATO DE UM TACO DE BEISEBOL.	5-27
FIGURA 5.13 - A DISTRIBUIÇÃO DE GALÁXIAS NO UNIVERSO PRÓXIMO. A LINHA MAIS CONCENTRADA À ESQUERDA É CONHECIDA COMO A GRANDE MURALHA. O NOSSO SISTEMA SOLAR ENCONTRA-SE NO CENTRO DA CIRCUNFERÊNCIA.....	5-27
FIGURA 5.14 - AGLOMERADO DE COMA. NOTE-SE A PRESENÇA DE UMA GALÁXIA ESPIRAL NO CENTRO E, ABAIXO E À ESQUERDA, UMA GALÁXIA ELÍPTICA ANÃ (PÁGINA ANTERIOR).....	5-27
FIGURA 5.15 - A LEI DE HUBBLE É VÁLIDA POR TODO O UNIVERSO CONHECIDO. ESTE DIAGRAMA INCLUI OS DEZ MAIORES AGLOMERADOS DE GALÁXIAS. O QUADRADO NO CANTO INFERIOR ESQUERDO REPRESENTA AS GALÁXIAS OBSERVADAS POR HUBBLE AO DESCOBRIR A LEI (ADAPTADA DE FERRIS, PÁG. 157).	5-27
FIGURA 5.16 - FOTOGRAFIA EM CORTE DA HISTÓRIA DO UNIVERSO. REGIÕES MAIS PRÓXIMAS DO VÉRTICE ENCONTRAM-SE MAIS PRÓXIMAS DE NÓS NO TEMPO.	5-27

FIGURA 5.17 - O DESACOPLAMENTO DA MATÉRIA COMUM DA RADIAÇÃO. NA FIGURA SUPERIOR, O ESPALHAMENTO THOMSON OBRIGA OS FÓTONS A PERCORREREM UM CAMINHO ALEATÓRIO. APÓS A RECOMBINAÇÃO, OS FÓTONS PODEMS SER PROPAGAR LIVREMENTE PELO UNIVERSO (FONTE: ADAPTADA DE SHU, PÁG. 394). 5-27

**FIGURA 5.18 - DISTRIBUIÇÃO DAS GALÁXIAS NA NOSSA VIZINHANÇA. OS AGLOMERADOS DE VIRGEM (V) E HIDRA-CENTAURO (H E C) PARECEM ESTAR SE MOVENDO NA DIREÇÃO DE UM “GRANDE ATRATOR”, PARTE DO QUAL PODE SER A GRANDE AGREGAÇÃO DE MATÉRIA A DIREITA DE VIRGEM E ABAIXO DE CENTAURO.....
..... 5-27**

FIGURA 5.19 - ESPECTRO DA RCF MEDIDO PELO SATÉLITE COBE. O PICO ENCONTRA-SE PRÓXIMO DA FREQUÊNCIA DE 6 CPS E TEM A FORMA DE UM CORPO NEGRO A UMA TEMPERATURA DE 2,7 K. 5-27

FIGURA 5.20 - DESENHO DO SATÉLITE COBE (COSMIC BACKGROUND EXPLORER), PROJETADO PELA NASA PARA ESTUDAR A RCF. ELE OPEROU DE NOVEMBRO DE 1989 A FEVEREIRO DE 1994 E GEROU O MELHOR CONJUNTO DE DADOS COSMOLÓGICOS DISPONÍVEIS HOJE. 5-27

FIGURA 5.21 - MAPAS DAS FLUTUAÇÕES DE TEMPERATURA PRODUZIDOS PELO SATÉLITE COBE. DE CIMA PARA BAIXO TEMOS UM MAPA BRUTO, COM A CONTRIBUIÇÃO DO NOSSO MOVIMENTO EM RELAÇÃO A RCF (UM DIPOLO), MAPA SEM DIPOLO, MAS COM A CONTRIBUIÇÃO DA GALÁXIA PRESENTE E, EM BAIXO, MAPA COM OS PRINCIPAIS ELEMENTOS DE CONTAMINAÇÃO REMOVIDOS. AS MANCHAS AZUIS (FRIAS) E ROSAS (QUENTES) CORRESPONDEM ÀS FLUTUAÇÕES DE TEMPERATURA NO UNIVERSO JOVEM..... 5-27

LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1 - DIVERSOS TIPOS DE GALÁXIAS ATIVAS E SUAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS.	5-27
TABELA 5.2 - MÉTODOS DE MEDIDAS DE DISTÂNCIA ÀS ESTRELAS.	5-27
TABELA 5.3 - ESCALA DO UNIVERSO CONHECIDO (ADAPTADA DE FERRIS, PÁG. 225).....	5-27
TABELA 5.4 - EVENTOS IMPORTANTES NA HISTÓRIA DO UNIVERSO.	5-27

5.1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas temos percebido um aumento rápido no conhecimento sobre a nossa vizinhança cósmica e, com as observações de objetos mais e mais distantes, a fronteira do Universo parece ter sido empurrada para os confins do tempo. Somos a primeira geração de seres humanos capazes de perceber os grandes detalhes da História Cósmica, das origens do Universo até o desfile das galáxias pelos céus. Nosso futuro será moldado pelo entendimento do Universo do qual fazemos parte. Nesse capítulo apresentaremos um breve resumo da História da Astronomia/Cosmologia, os constituintes do Universo em escalas maiores do que as vistas até agora (o Sistema Solar), as idéias relativas às suas origens e evolução, os fenômenos em grande escala que observamos no Universo, uma descrição do modelo cosmológico padrão e um pequeno ensaio sobre o futuro do Universo.

5.1.1 UMA PERSPECTIVA HISTÓRICA

As origens de uma visão cosmológica do Universo, no início da civilização humana, estão diretamente ligadas aos conceitos míticos que povoaram as religiões dos povos antigos. Como as fronteiras do “mundo conhecido” eram muito desconhecidas, cada civilização adequava seu “universo” ao mundo terreno, Sol, Lua e planetas. Essa associação tinha raízes numa necessidade de organizar o “Cosmos” e, de alguma forma, explicar a origem do lugar onde o Homem vivia. Ao falar da História da Cosmologia, a associação de corpos errantes no céu com divindades nos remete diretamente ao conceito de magia, que hoje pode ser vista como uma forma de sintetizar o mundo natural e seu relacionamento com o Homem. Nessa época o Homem vivia num mundo de relacionamentos e afinidades, cuja pretensa manipulação era feita pelos Magos, com o objetivo de compreender e dominar as forças da natureza. Nesse sentido, enquanto “experimentador de técnicas mágicas”, o mago pode ser considerado como o antepassado do cientista e, por que não?, do astrônomo, uma vez que muitas das

crenças mágicas envolviam rituais em que a necessidade de se prever ou aproveitar os ciclos celestes era premente. As crenças inconstantes do Homem a respeito do céu e o desenvolvimento

telescópio por Galileu e com a descoberta das Leis de Kepler. A partir desses três marcos e das descobertas científicas de Newton (séc. XVII), a Astronomia tomou ares de ciência e começou a evoluir de forma quantitativa e qualitativa.

Entretanto, a noção real de que um “universo” existe além do nosso Sistema Solar só veio aparecer no séc. XIX e a cosmologia, enquanto ciência individual, somente passou a ser considerada no séc. XX. É dessa época que partiremos para discutir a formação, estrutura em grande escala e composição do Universo.

5.1.2 O QUE É COSMOLOGIA?

A Cosmologia é a ciência que estuda a origem, estrutura e evolução do Universo e é uma ciência multidisciplinar. Seu objetivo é entender como o Universo se formou, por que ele tem a forma que hoje vemos e qual será o seu destino no futuro. As principais ferramentas utilizadas para esse entendimento vêm da Física, Matemática e da Astronomia. Da Física vem as leis que descrevem fenômenos físicos nos laboratórios da Terra e, ao verificarmos que elas descrevem fenômenos semelhantes em lugares distantes do Universo, podemos reafirmar seu caráter universal. De certa maneira, um cosmólogo utiliza o Universo como um imenso laboratório. A Matemática nos dá a linguagem utilizada para registrar os processos observados e que permitem uma descrição precisa dos fenômenos astronômicos. Da astronomia utilizamos as técnicas de observação do céu, medição do tempo e determinação das escalas de distância envolvidas. Observações astronômicas de objetos e fenômenos distantes são utilizadas pelos cosmólogos na montagem do quebra-cabeças que é entender o Universo. Podemos ainda incluir, no rol das ferramentas, a Química e a Filosofia. A primeira é importante no estudo da composição da matéria no meio interestelar e a segunda fornece o arcabouço que insere a Cosmologia na hierarquia do pensamento humano. Nosso conhecimento de Física, associado às observações astronômicas, sugere que o Universo em que vivemos deve ter uma idade aproximada entre 10 e 15 bilhões de anos; indica também que praticamente desconhecemos de que tipo de matéria ele é formado e, ainda, que não se sabe muito sobre sua geometria.

Há quase 70 anos sabemos que o Universo está se expandindo e que galáxias e grandes estruturas (combinações de aglomerados de galáxias, com centenas de milhões de anos luz de tamanho) distantes de nós se afastam com uma velocidade que é tanto maior quanto mais distante elas se encontrarem de nós. Esse movimento é chamado de “velocidade de recessão das galáxias” ou “Recessão de Hubble”. Nossos “vizinhos cósmicos” mais próximos possuem um movimento peculiar combinado à recessão, aparentando estar, muitas vezes, se aproximando de nós. A explicação desse paradoxo é que nós e eles estamos na mesma região de expansão, de modo que a combinação das velocidades de recessão e peculiar (a velocidade própria do “vizinho”) faz com que ele pareça estar se aproximando de nós, embora esteja também em expansão como todo o resto do Universo. A partir desses dados, os cosmólogos calcularam que o Universo deve ter sido criado num passado distante, por volta de 10 a 15 bilhões de anos.

Nos seus primeiros instantes o Universo devia parecer uma mistura homogênea de radiação e matéria, ambos num estado extremamente denso e quente. À medida que ele se expandia, a temperatura dessa radiação abaixou e, num dado momento, permitiu que a imensa maioria dos átomos de hidrogênio e hélio existentes no Universo se formassem. Esse processo é conhecido como a nucleossíntese primordial. A matéria gerada nesse processo é conhecida como matéria bariônica. Outros tipos de partículas conhecidas, como os neutrinos e partículas hipotéticas (resultados de diversas teorias de física de partículas) são normalmente chamadas de “matéria escura”.

Apesar das observações de galáxias distantes acontecerem desde o século passado, a corrida para o que hoje se convencionou chamar de “Cosmologia Experimental” começou com a descoberta da Radiação Cósmica de Fundo em Microondas (RCF), feita por Arno Penzias e Robert Wilson em 1965, e da sua associação com o estado primordial denso e quente mencionado no parágrafo anterior. A combinação da Recessão de Hubble com a Nucleossíntese Primordial e a descoberta da RCF constitui o que se costuma chamar de “suporte observacional” do Modelo Cosmológico Padrão, ou Modelo do BIG BANG, que será o assunto da Seção 5.4.

5.1.3 QUAIS PROBLEMAS A COSMOLOGIA SE PROPÕE A RESOLVER?

Ao observar o céu, o homem pode “definir” o tamanho do seu Universo em função das limitações dos instrumentos disponíveis ou do tamanho da região acessível a seus olhos. Isso não quer dizer que não existam fenômenos além das regiões que conseguimos ver. Nosso universo tem as fronteiras tecnológicas (que serão superadas à medida que instrumentos mais potentes forem sendo criados) e as barreiras impostas pelas leis físicas. Nesse caso estamos limitados pelas velocidades com que a radiação eletromagnética (que pode ser luz, ondas de rádio, raios X) se propaga.

Assim, é fácil estender o raciocínio e imaginar que existem fenômenos astronômicos que já aconteceram, mas cuja informação, o sinal eletromagnético (na forma de ondas de rádio, por exemplo) ainda não chegou até nós porque a fonte encontra-se muito distante da Terra. Além da questão da distância existe o problema de que a atmosfera da Terra absorve a radiação eletromagnética incidente em quase todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético. As únicas “janelas” visíveis do solo são a visível e a faixa em rádio (Figura 5.1).

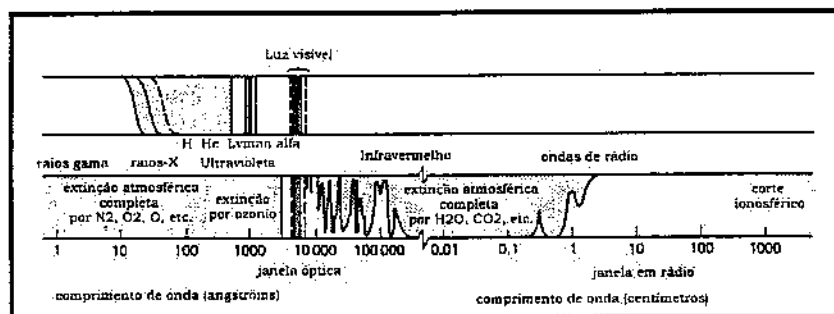


FIGURA 5.1 - ESPECTRO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA, DE RAIOS GAMÁ ATÉ ONDAS LONGAS DE RÁDIO. NA FAIXA INFERIOR DA FIGURA, AS REGIÕES DE ABSORÇÃO DE RADIAÇÃO ESTÃO MARCADAS EM CINZA. NA REGIÃO DE CORTE DO INFRAVERMELHO, VÁRIAS BANDAS AINDA SÃO VISÍVEIS DO SOLO (ENTRE 10^{-6} E 10^{-4} CM) A FAIXA SUPERIOR MOSTRA AS FAIXAS DE RADIAÇÃO ACESSÍVEIS A OBSERVAÇÕES A BORDO DE SATÉLITES OU FOGUETES, ACIMA DA ATMOSFERA.

Estudando a radiação eletromagnética que essas fontes emitem, podemos estimar a distância a que elas se encontram, mapear o Universo e encontrar respostas para muitas das perguntas fundamentais formuladas pelo Homem desde que começou a olhar para o céu... Em última instância, sempre estaremos questionando nossas origens: quem somos? De onde viemos? Para onde vamos? Contudo, parte da motivação para o estudo da Cosmologia vem do aparecimento de questões mais recentes, relacionadas com o desenvolvimento da Ciência em geral, tais como:

- Como o Universo foi formado e como ele terminará?
- O que é a matéria escura e qual o seu papel na cena cosmológica?
- Como as estruturas de matéria em grande escala se formaram?
- Qual o tamanho e a geometria do Universo?
- O que se pode aprender sobre a física estudando o BIG BANG?
- A Física e a Cosmologia oferecem uma descrição aceitável da criação?

A pesquisa fundamental em Cosmologia envolve técnicas e instrumentação extremamente sofisticadas, muitas vezes desenvolvida especificamente para este tipo de pesquisa. Parte da motivação para se desenvolver os supercomputadores vem da necessidade de se usar processadores mais e mais poderosos para simular a formação e evolução das primeiras galáxias. Além disso, certas condições físicas no Cosmos são extremas e jamais poderão ser conseguidas na Terra, de modo que a Cosmologia associa-se à Física para utilizar o Universo como um grande laboratório. Finalmente, o apelo intelectual e o conhecimento das perspectivas sobre o Universo em que vivemos podem servir até como fator de orientação ética, direcionando as idéias do Homem e fornecendo parâmetros para orientar escolhas que podem definir o futuro da nossa espécie. Nesse sentido, a Física, a Astronomia e a Cosmologia não geram conhecimento supérfluo e irrelevante – sua importância é vital.

5.2 GALÁXIAS: NOSSA VIZINHANÇA CÔSMICA

Numa noite escura e longe das luzes da cidade, vemos que, independente de que região na Terra estivermos, é notável a existência de uma faixa concentrada de estrelas que cruza o céu. Essa faixa é chamada de Via Láctea: a Galáxia onde nosso Sistema Solar está localizado. A forma mais simples de perceber que a Via Láctea é uma galáxia espiral é observar a emissão rádio ao longo do plano; a faixa de estrelas que vemos no céu é o plano da Galáxia. Veja um esboço da sua estrutura nas Figuras 5.2 e 5.3. Ela possui a forma de uma espiral, sobre a qual falaremos nessa Seção e é constituída de um disco com um núcleo (a região do plano) e um halo com a forma de uma esfera que envolve o disco.

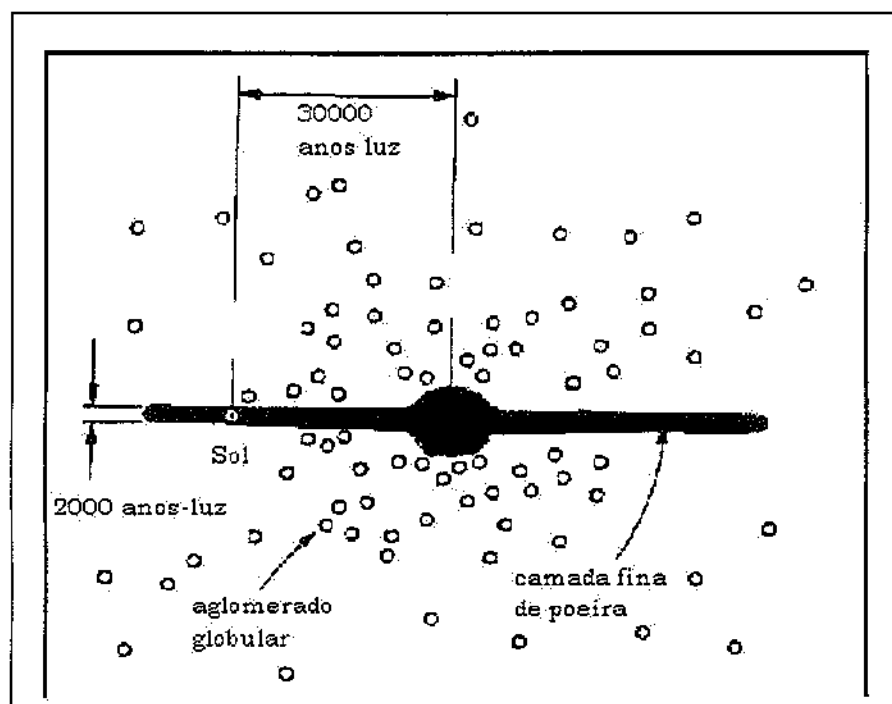


FIGURA 5.2 - ESTRUTURA DA NOSSA GALÁXIA, COM O DISCO REPRESENTADO EM PRETO E A PARTE DO HALO COBERTA PELOS AGLOMERADOS GLOBULARES. A DISTÂNCIA DO SISTEMA SOLAR AO CENTRO DA GALÁXIA ESTÁ MARCADA NA PARTE SUPERIOR DA FIGURA.

A porção da Via Láctea observada a olho nu corresponde a uma região bastante limitada de toda a Galáxia. Ela é uma região centrada no Sistema Solar, com raio de aproximadamente 13000 anos-luz (cerca de 4000 parsecs).

5.2.1 A ESTRUTURA DA NOSSA GALÁXIA

Somente podemos ver a olho nu a faixa de estrelas que constituem o disco da Galáxia, mas existem outros dois componentes tão importantes quanto as estrelas: o gás interestelar e a poeira. Vamos então discutir qual é a forma da nossa Galáxia. Conforme mencionamos, podemos entender a forma da Galáxia se pensarmos num disco com um bojo no centro, envolvido por um halo esférico. O diâmetro desse disco, estimado através das medidas de hidrogênio através do plano, é da ordem de 100000 anos luz. A espessura do disco é muito menor, da ordem de 2000 anos luz. O nosso Sistema Solar encontra-se a cerca de 30000 anos luz do centro da Galáxia, num dos braços espirais.

Como visto no capítulo 4, ao observarmos as estrelas notamos que a imensa maioria delas se distribui ao longo da seqüência principal no diagrama HR. Tipicamente, as estrelas podem ser divididas em dois grupos: tipo I, que caracteriza as estrelas mais jovens e com composição química mais heterogênea (formadas de hidrogênio, hélio e uma fração de elementos mais pesados que os dois), e tipo II, as mais antigas, com composição química mais homogênea (praticamente só hidrogênio e hélio), semelhante à da nuvem-mãe que deu origem à Galáxia. As estrelas mais jovens acabam, pela estrutura dos braços espirais e gravidade local, concentrando-se em regiões próximas do plano. As estrelas mais antigas estão principalmente localizadas em aglomerados globulares, espalhados pelo halo.

Essa concentração de estrelas em aglomerados é normal e observada na nossa e em outras galáxias. Aglomerados estelares são extremamente importantes no estudo da evolução estelar e galáctica. Objetos formados em aglomerados possuem tipicamente a mesma composição química, a mesma idade e estão situados aproximadamente à mesma distância de nós. Então, estudar as estrelas em aglomerados nos permite ver

objetos em estágios evolutivos diferentes, mas que foram formados a partir daquelas mesmas condições iniciais. Classificamos os aglomerados em abertos e globulares. Aglomerados abertos estão concentrados no disco e contém, em média, 100 objetos, quase que só do tipo I. Eles são um grupo esparsos, cujas componentes estão ligeiramente ligadas pela gravidade. Exemplos clássicos de aglomerados abertos são as Plêiades e as Híades (na constelação de Touro). Já os aglomerados globulares, mencionados no parágrafo anterior, são fortemente ligados pela gravidade, possuem uma forma esférica bem definida (com raio da ordem de uns 100 anos luz) e contém cerca de 100000 estrelas. A maioria das estrelas componentes são do tipo II.

Vamos olhar agora para os outros componentes das galáxias: as nuvens de gás e poeira. As nuvens de gás interestelar são uma espécie de resíduo do processo de formação das estrelas, conforme discutido no capítulo 4. Regiões espalhadas pela nuvem se condensam e dão origem às estrelas; o gás que resta após o processo de formação continua espalhado entre as estrelas e “confinado” ali pela força da gravidade. A existência de nuvens ao longo do plano da Galáxia e em seus braços é responsável pelo obscurecimento (absorção da luz emitida pelas estrelas mais distantes) ao longo do plano. Partículas de poeira cósmica são também responsáveis pelo obscurecimento ao longo do plano Galáctico na faixa óptica. O tamanho dos grãos de poeira é da ordem de alguns milésimos de milímetros e emitem principalmente radiação infravermelha. Essa emissão é uma forma de reprocessamento da luz visível, absorvida pelos grãos, utilizada para aquecê-los e depois retransmitida no infravermelho.

O astrônomo Robert Trumpler mostrou, em meados da década de 30, que poeira e gás eram responsáveis pelo obscurecimento do plano Galáctico. Vemos uma grande quantidade de estrelas espalhadas pelo plano, mas não conseguimos ver outras galáxias através dele exatamente por essa razão. Ao olhar para fora do plano, vemos menos estrelas e mais galáxias distantes. Trumpler mostrou que a luz emitida pelas estrelas é reduzida pela metade a cada 3000 anos luz (ver a definição de ano-luz no Capítulo 4) percorridos ao longo do plano galáctico. Assim a radiação eletromagnética emitida do centro da Galáxia chega até nós (localizados a 30000 anos luz do centro) com uma

intensidade $(1/2)^{10}$, ou seja, aproximadamente 0,001 vezes a intensidade inicial, devido à absorção pelas nuvens de gás e poeira. Como estudar então o outro lado da Galáxia? Como sabemos que ela tem a forma de uma espiral, com braços ao redor de um núcleo? Como mapeamos essa estrutura de “disco + halo”, mencionada no começo dessa Seção? É simples! Não nos baseamos na luz visível para fazer esse mapeamento, mas no estudo da emissão rádio e infravermelho. Esses comprimentos de onda são pouco absorvidos e podemos então traçar o contorno da Galáxia usando medidas nos diferentes braços espirais (Figura 5.3).

5.2.2 AS FORMAS CONHECIDAS: ESPIRAIS, ELÍPTICAS E IRREGULARES

A maior parte das galáxias possui características que permitem classificá-las como espirais ou elípticas. Galáxias elípticas possuem uma aparência oval e algumas são quase esféricas. Elas apresentam núcleos brilhantes com regiões externas mais tênues e não possuem uma borda claramente definida. Tipicamente quase não contêm gás ou poeira, a matéria prima que permite a formação contínua de estrelas. Em consequência, galáxias elípticas são formadas, em grande maioria, por estrelas de população II (velhas).

A faixa de massa e tamanho das galáxias elípticas é grande, cobrindo desde anãs (pouco maiores que um aglomerado globular) até raras gigantes (como M87) e supergigantes, com mil vezes a massa da nossa galáxia e cerca de 500000 anos luz de diâmetro. A maioria das galáxias (mais de 60%) é elíptica, em grande parte galáxias anãs. Na classificação de galáxias, as elípticas são identificadas pela letra E seguida de um número que define os diversos tipos de elípticas.

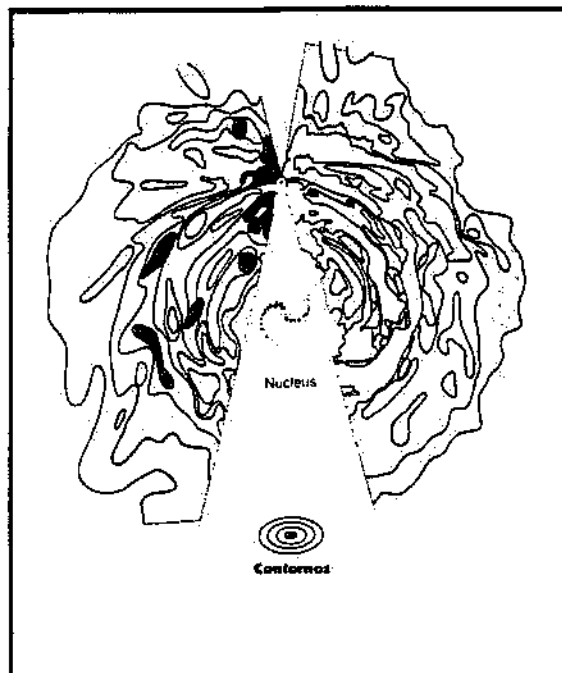


FIGURA 5.3 - EMISSÃO DE RÁDIO NO COMPRIMENTO DE ONDA DE 21 CM, PRODUZIDA POR HIDROGÊNIO NEÚTRO, E USADA PARA MAPEAR OS BRAÇOS ESPIRAIS DA VIA LÁCTEA.

Galáxias espirais, como a nossa, têm discos com núcleos e halos difíceis de serem vistos principalmente por causa do brilho do núcleo e do disco. Como o disco e os braços espirais são constituídos de estrelas de população I, jovens, e contém bastante gás e poeira, especialmente nos braços, elas possuem uma taxa alta de formação de estrelas, que explica esse brilho. O halo é constituído de uma população de estrelas tipo II. Os braços espirais estão enrolados em torno do núcleo, dando não mais do que uma volta ao seu redor. As galáxias espirais formam duas seqüências separadas: as espirais barradas (Sb) e as espirais normais (S). Espirais normais são subdivididas em Sa (núcleos grandes; pequenos braços enrolados), Sb (núcleos menores; braços menos enrolados) e Sc (núcleos bem pequenos; braços quase “desacoplados” do núcleo). Cerca de um terço das galáxias espirais observadas são barradas e sua subclassificação é a mesma: SBa, SBb e SBc. A razão da existência da barra ainda não é bem entendida

pelos astrônomos. O intervalo de massa das espirais é bem menor que o notado nas elípticas, variando entre 100 e algumas centenas de bilhões de vezes a massa do Sol.

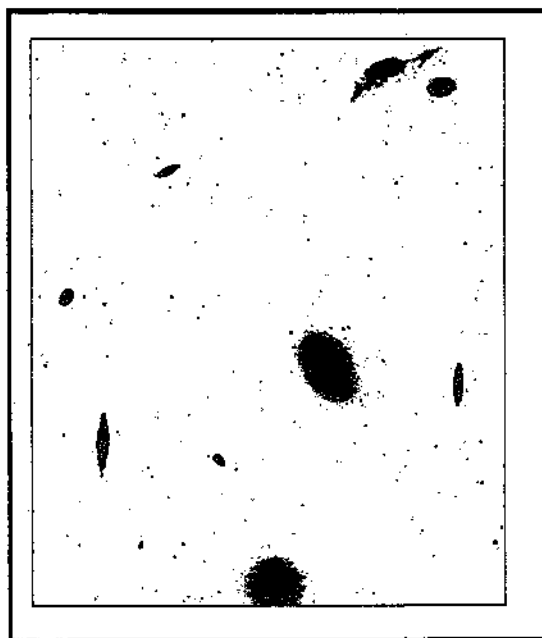


FIGURA 5.4 - PARTE CENTRAL DO AGLOMERADO DE VIRGEM. AS DUAS GALÁXIAS ELÍPTICAS GIGANTES NO CENTRO E EMBAIXO DA FIGURA SÃO, RESPECTIVAMENTE, M84 E M86 (FONTE: SHU, PÁG. 340).

As Figuras 5.4 e 5.5 mostram fotos de galáxias elípticas e espirais. Nota-se claramente a diferença em suas estruturas. Entretanto, não se tem uma idéia clara do porquê da existência dos braços espirais, ou melhor, da forma espiral. O dilema dos braços (como se formaram? Por que não se enrolam ao redor do núcleo da galáxia?) vem sendo estudado desde o início do século e a sugestão mais aceitável, dada pelo astrônomo sueco Bertil Lindblad e aperfeiçoada pelo matemático americano C.C. Lin, é que os braços das galáxias espirais são “cristas” de uma onda de densidade que se propagam ao redor do centro da galáxia. Cada período dessa onda é da ordem de algumas dezenas de milhões de anos. Coincidentemente, esse é o tempo de vida das estrelas tipo O e B presentes nos braços das espirais. A teoria das ondas de densidade sugere que a energia transferida pela onda é capaz de “iniciar a ignição” das estrelas de grande massa

(de uma forma ainda não entendida claramente) e, ao final de suas vidas, a onda está também acabando de passar por aquela região, de modo que, em seguida, ela voltará “às escuras” e a onda irá iniciar o processo de formação estelar em outra parte da galáxia, seguindo a onda de densidade.

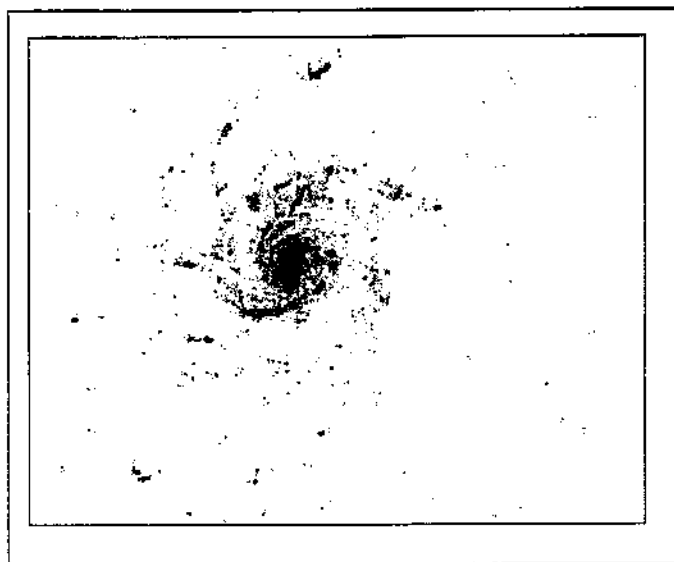


FIGURA 5.5 - NEGATIVO DA FOTO DE MESSIER 101, UMA GALÁXIA ESPIRAL DO TIPO SCl, QUE VEM SENDO UM OBJETO IMPORTANTE NO DEBATE SOBRE AS ESCALAS DE DISTÂNCIA DO UNIVERSO (FONTE: SHU, PÁG. 268).

Edwin Hubble classificou os vários tipos de galáxias em um diagrama semelhante a um diapasão, onde as elípticas formam um grupo em um dos lados do diapasão e as espirais são divididas no “garfo” (Figura 5.6). A classificação é baseada na aparência das galáxias. Na junção dos três braços, Hubble colocou o tipo S0, que é bastante estranho e combina propriedades de ambos os tipos. Elas tem a forma e o disco das espirais, mas não tem gás e poeira que permitem a formação de estrelas. A velocidade de rotação e a quantidade de poeira crescem das elípticas para as espirais. Apesar dessas diferenças, não existe nenhuma evidência que um tipo de galáxia evolui para o outro. Provavelmente as características que mencionamos aqui são todas determinadas nos instantes de formação de cada uma ou por uma colisão, no caso das galáxias elípticas.

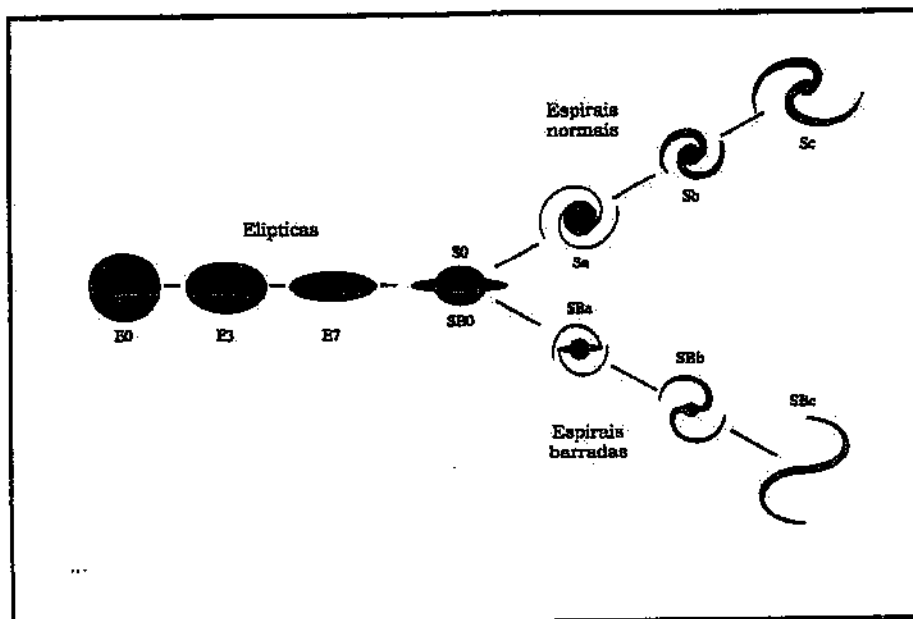


FIGURA 5.6 - DIAGRAMA DE HUBBLE PARA A CLASSIFICAÇÃO DE GALÁXIAS REGULARES (FONTE: SHU, PÁG. 294).

Uma pequena percentagem de galáxias estudadas não se encaixa nas classificações acima, sendo então denominadas irregulares (Irr). Nossas vizinhas mais próximas, a Pequena e a Grande Nuvem de Magalhães são exemplos típicos de galáxias irregulares.

Existem ainda galáxias compactas e extremamente brilhantes e densas descobertas por Fritz Zwicky e, ainda, outras que apresentam formas distorcidas e estranhas. Em alguns casos essas formas podem ser explicadas por interação com algum objeto próximo (galáxias vizinhas), mas em outros a causa da distorção é, simplesmente, desconhecida. Pode-se ver exemplos de todos os tipos de galáxias na Figura 5.7.

5.2.3 A FORMAÇÃO DAS GALÁXIAS

As galáxias devem ter sido criadas há bilhões de anos atrás. Tanto quanto sabemos, todas elas possuem estrelas de população tipo II, logo sua idade deve ser de, pelo menos, uns 8 ou 10 bilhões de anos, que é a idade típica das estrelas de população II. O

Universo hoje é muito velho para formar novas galáxias, porque o gás espalhado entre as galáxias e aglomerados possui uma densidade muito baixa para formar novas estruturas. A densidade média de uma galáxia é da ordem de um átomo por centímetro cúbico. Essa seria a densidade se todas as estrelas fossem dissolvidas e espalhadas uniformemente pelo volume da galáxia.

Embora extremamente baixa para os nossos padrões (a densidade do nosso corpo é de 1 g.cm^{-3} , ou 1×10^{24} átomos por centímetro cúbico), essa densidade ainda é cerca de um milhão de vezes maior do que a densidade média do Universo hoje (cerca de $10^{-30} \text{ g.cm}^{-3}$). Entretanto, quando o Sistema Solar se formou a densidade do Universo era cerca de 10 vezes maior do que a densidade de hoje. Quando o Universo tinha cerca de 10 milhões de anos, sua densidade era cerca de um milhão de vezes maior do que hoje (um átomo de hidrogênio por centímetro cúbico) e as galáxias ainda estavam em processo de formação.

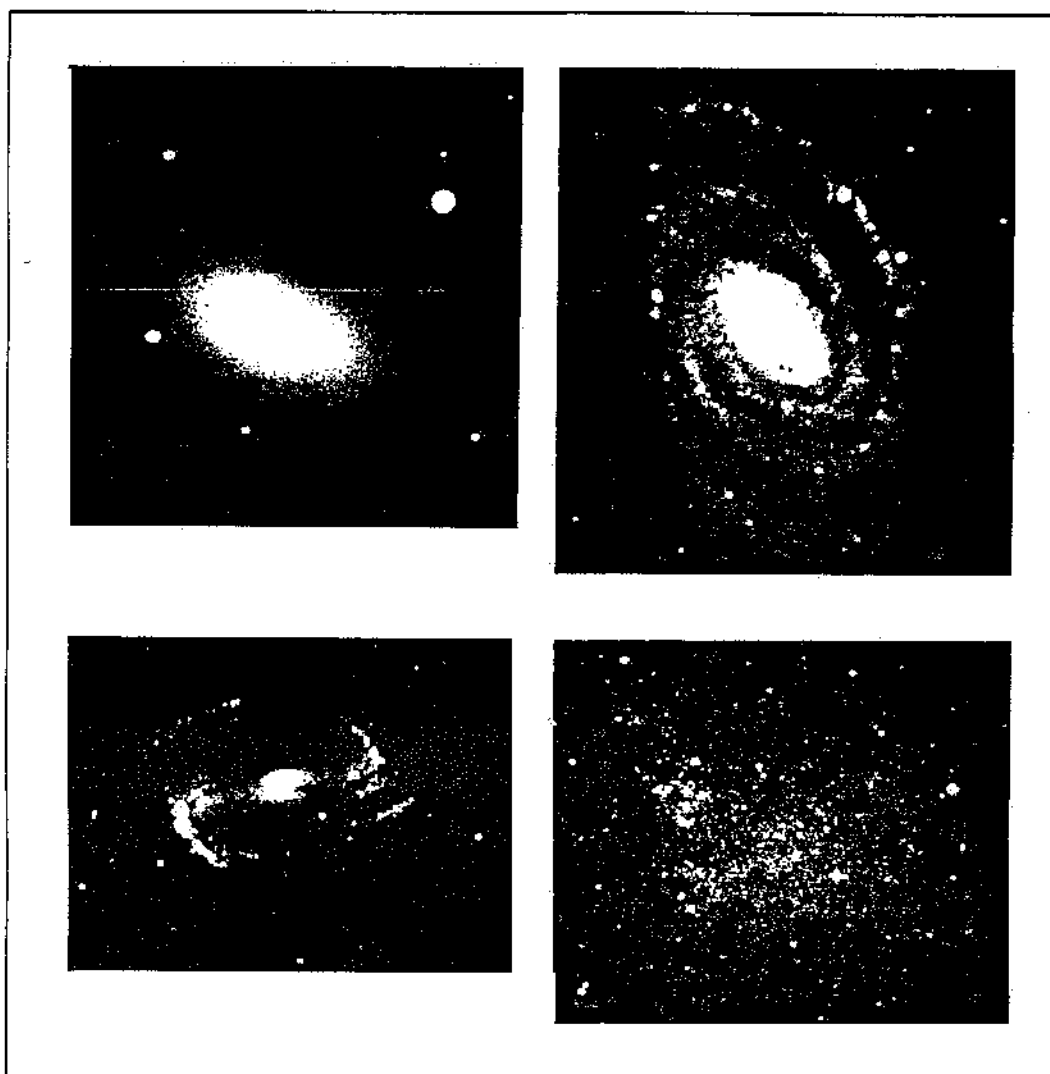


FIGURA 5.7 - EXEMPLOS (DE CIMA PARA BAIXO NO SENTIDO HORÁRIO) A) GALÁXIA ELÍPTICA, B) GALÁXIA ESPIRAL ORDINÁRIA, C) GALÁXIA ESPIRAL BARRADA E D) GALÁXIA IRREGULAR.

Basicamente, a teoria de formação e evolução das galáxias envolve uma participação importante da força gravitacional. A teoria do colapso sugere que galáxias, da mesma forma que estrelas, formaram-se a partir de uma nuvem de hidrogênio e hélio, ambos criados nos primeiros instantes de vida do Universo (mais precisamente, nos três primeiros minutos). Inicialmente, essas nuvens se expandiam junto com a

expansão do próprio universo; depois de um certo tempo, a atração gravitacional de uma região um pouco mais densa dentro da nuvem fez com que ela se expandisse mais lentamente. Finalmente, após alguns milhões de anos, ao invés de continuar a expansão, a nuvem começou a se contrair e a separação entre diferentes nuvens foi aumentando. A Figura 5.8 mostra como esse processo provavelmente ocorreu.

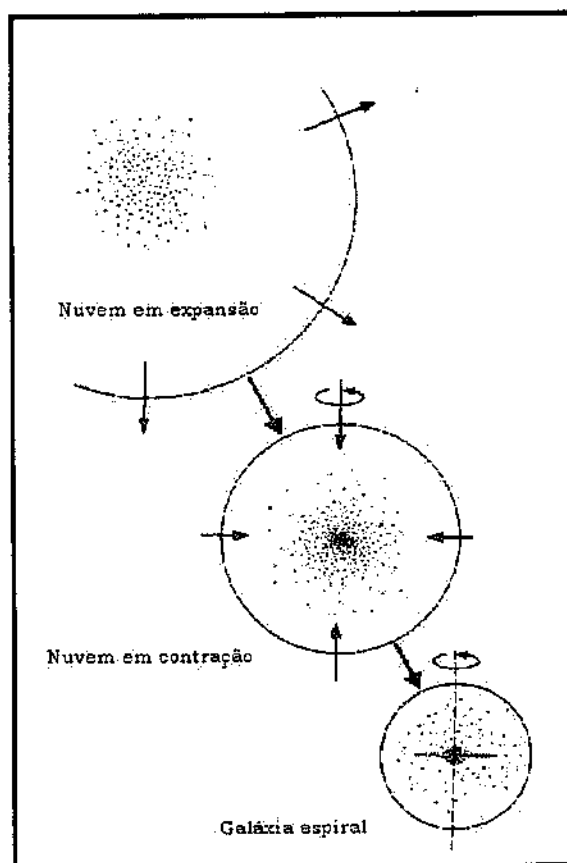


FIGURA 5.8 - DE CIMA PARA BAIXO, VEMOS UMA NUVEM DE GÁS EM EXPANSÃO; NO CENTRO A NUVEM COMEÇA A COLAPSAR SOB O EFEITO DA MATÉRIA CONCENTRADA NO SEU INTERIOR. EMBAIXO, ESTRELAS DE POPULAÇÃO II SÃO FORMADAS NO NÚCLEO. AS REGIÕES EXTERNAS DO GLOBO CAEM PARA O CENTRO E CRIAM UM DISCO DE GÁS EM ROTAÇÃO ONDE ESTRELAS DE POPULAÇÃO I IRÃO, FUTURAMENTE, SE FORMAR.

A maioria das galáxias aparentam ser entidades independentes, interagido umas com as outras devido à força gravitacional. Isso é uma “ilusão” causada pela impossibilidade de telescópios observarem a enorme quantidade de gás existente entre as galáxias. Uma enorme quantidade de gás parece existir em todos os aglomerados de galáxias e sua presença é notada devido à emissão de raios X, que ocorre quando o gás é acelerado pelo campo gravitacional das galáxias. Durante o processo evolutivo, colisões dos mais diversos tipos devem acontecer entre galáxias, algumas bastante dramáticas, especialmente quando galáxias espirais estão envolvidas. Grupos e aglomerados certamente são afetados pela força gravitacional dos outros componentes e, muitas vezes, ocorre a fusão de duas galáxias para formar uma galáxia gigante ou, quando o evento é muito violento, uma onda de choque pode romper a estrutura estável e destruir as galáxias envolvidas na colisão.

5.2.4 RADIOGALÁXIAS E QUASARES

O início da observação do Universo na faixa de rádio do espectro eletromagnético ocorreu na década de 30 com Karl Jansky e Grote Reber. A partir do final da II Guerra Mundial, radiotelescópios começaram a ser construídos na Inglaterra e Austrália e hoje, grande parte da pesquisa feita sobre o Universo distante é possível porque a emissão em rádio é capaz de viajar grandes distâncias sem sofrer nenhum tipo de absorção no meio intergaláctico.

Centenas de radiofontes foram descobertas nos últimos 50 anos e a grande maioria delas foi associada a um objeto também visível no óptico. Assim, Taurus A (a fonte mais intensa observada na constelação de Touro) foi associada à nebulosa do Caranguejo, uma nuvem de gás produzida por uma explosão de supernova em 1054 DC. Cignus A (ou 3C 405) foi identificada com uma galáxia gigante a cerca de UM BILHÃO de anos luz. A maior parte das fontes de rádio muito intensas também visíveis no óptico são galáxias e emitem milhões de vezes mais energia em rádio que a nossa galáxia. Elas emitem mais energia em rádio do que na faixa visível e, normalmente, são galáxias elípticas gigantes, em geral os objetos mais brilhantes dos aglomerados

de galáxias. O mecanismo responsável por essa enorme geração de energia é chamado de *emissão sincrotron*. As ondas de rádio são emitidas por elétrons livres que se movem numa trajetória espiral em torno de campos magnéticos nessas radiofontes. Os elétrons possuem energias muito grandes, mas, paradoxalmente, os campos magnéticos que os aprisionam são muito mais fracos que o campo magnético terrestre.

A Figura 5.9 mostra um mapa de emissão sincrotron de todo o céu, com destaque para o plano da nossa Galáxia, feito na frequência de 408 MHz. Esse mapa, feito por Haslam e colaboradores, é famoso por ter sido montado a partir da combinação de medidas em diversos telescópios ao longo de 15 anos. A maior parte da emissão concentra-se no plano da Via Láctea (que tem a forma de uma “corcova”) e um bom número de radiofontes individuais dentro e fora da Galáxia aparecem também na figura.

Atualmente, com os modernos radiotelescópios, é possível estudar em detalhes a estrutura das radiofontes e descobriu-se algo bastante interessante sobre sua forma geral. A maioria delas tem uma estrutura “dupla” e a emissão de rádio localiza-se principalmente nas extremidades dessa estrutura, em regiões que chamamos de componentes extensas (Figura 5.10). Elas encontram-se separadas por centenas de milhares de anos luz e a radiogaláxia situa-se entre ambas as componentes. Frequentemente a região central é também uma radiofonte que também contém duas componentes emissoras separadas tipicamente por somente algumas centenas de anos luz. Dividimos então as radiofontes em extensa (as estruturas externas) e compactas (as regiões na própria radiogaláxia).

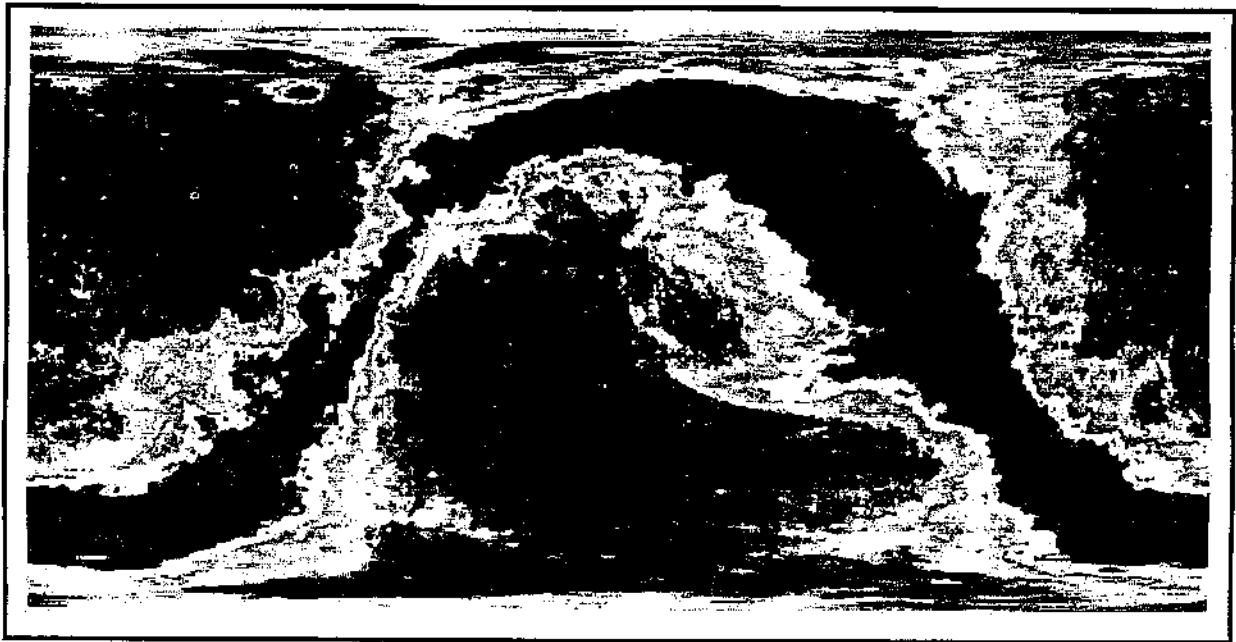


FIGURA 5.9 - MAPA DE EMISSÃO SINCROTRON FEITO POR HASLAM E COLABORADORES. A FREQUÊNCIA DE OBSERVAÇÃO É 408 MHz E O PLANO DA GALÁXIA É A FAIXA INTENSA, NA FORMA DE CORCOVA, SITUADA AO LONGO DO MAPA.

Os quasares foram inicialmente identificados como radiofontes fracas e, posteriormente, como estrelas estranhas na nossa própria Galáxia que eram fortes emissoras de rádio. A descoberta de sua real natureza aconteceu em 1963, quando Marteen Schmidt descobriu que as linhas espectrais do objeto 3C 273 estavam deslocadas de sua posição original no laboratório de cerca de 16%, na direção de comprimentos de onda mais longos. Em outras palavras, o comprimento de onda medido apresentava um desvio para o vermelho (ou "redshift") de 16%; isso significava que ele estava se afastando de nós com uma velocidade de 16/100 da velocidade da luz. Nota-se, na Figura 5.11, a diferença entre as posições das linhas no espectro de diversas galáxias distantes e as posições das linhas H e K do cálcio, deslocadas em função da distância. Por hora, é interessante comentar que um desvio para o vermelho de 0,16 corresponde, grosseiramente, a uma distância de 2 bilhões de anos-luz. Depois disso, muitas outras radiofontes foram identificadas

como objetos semelhantes à estrelas, mas com grande desvio para o vermelho. O nome QUASAR vem da contração de QUASI-STELLAR RADIO SOURCE e está hoje associado a fontes remotas que emitem grandes quantidades de energia e que apresentam um grande desvio para o vermelho em suas linhas espectrais.

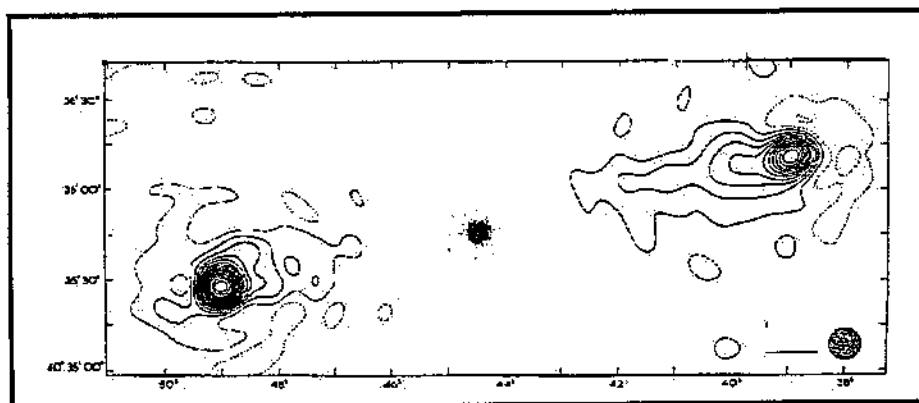


FIGURA 5.10 - MAPA EM RÁDIO DE CIGNUS A, UMA RADIOFONTE CLÁSSICA. A IMAGEM CENTRAL (NA FORMA DE UMA PEQUENA BORBOLETA) REPRESENTA A REGIÃO EMISSORA NO ÓPTICO. AS DUAS ESTRUTURAS SIMÉTRICAS EM RELAÇÃO AO CENTRO SÃO OS CHAMADOS LOBOS EMISSORES E EMITEM UMA ENORME QUANTIDADE DE ENERGIA NA FAIXA DE RÁDIO. O TAMANHO TÍPICO DESSAS ESTRUTURAS EM RÁDIO É DA ORDEM DE ALGUNS MILHÕES DE ANOS-LUZ.

Mas o que são os quasares? Ainda não se tem uma resposta satisfatória para essa pergunta... a resposta mais aceita (mas absolutamente não unânime) é que eles são objetos semelhantes a galáxias, mas localizados a distâncias MUITO maiores. E, para aparecerem no céu com o aspecto de estrelas fracas, mas situados a distâncias tão grandes, sua taxa de geração de energia deve ser fenomenal! Além disso, os quasares apresentam uma variação, às vezes regular, na emissão de radiação que é notável em alguns poucos dias (no óptico) ou mesmo horas (em raios X) de observação. Como a variabilidade na emissão de um objeto não pode acontecer num tempo menor do que a luz leva para se propagar de um lado a outro desse mesmo objeto, a variação na luminosidade emitida nos dá uma estimativa do tamanho dele.

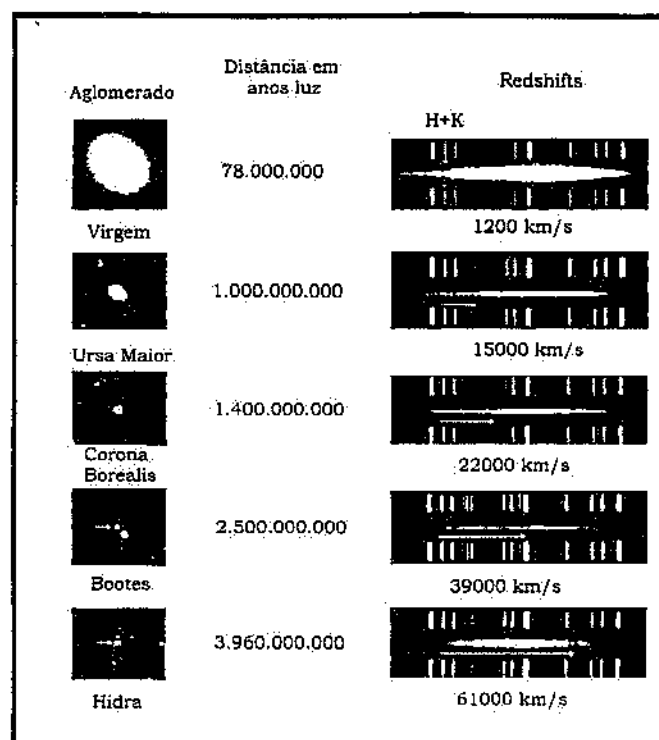


FIGURA 5.11 - RELAÇÃO REDSHIFT X DISTÂNCIA PARA DIVERSAS FONTES EXTRAGALÁCTICAS. AS FLECHAS À DIREITA INDICAM O DESLOCAMENTO DAS LINHAS H E K DO CÁLCIO (CORTESIA DO OBSERVATÓRIO PALOMAR).

Observações de quasares na faixa de raios X e uma interpretação cosmológica (associada à idade e à distância que tais objetos se encontram) sugerem que o núcleo de um quasar deve ter o tamanho aproximado do nosso sistema solar (o intervalo de tamanho estimado é de um dia-luz a uma semana-luz), mas emitindo uma energia cerca de 10 trilhões de vezes maior que a do Sol. É natural, portanto, que essa hipótese não seja um consenso entre astrônomos, devido à sua desproporção..

Os quasares são bastante semelhantes às radiogaláxias e também podem ter componentes compactas ou extensas. Na verdade, nem sempre os astrônomos conseguem distinguir perfeitamente entre um quasar e o núcleo brilhante de uma radiogaláxia. Possivelmente quasares e núcleos de radiogaláxias são o mesmo objeto, que se comporta de forma diferente ao longo de sua evolução.

Ainda não se sabe também qual é o mecanismo que alimenta essa produção fenomenal de energia. Parece ser consenso que a transformação de energia gravitacional em energia luminosa é o mecanismo alimentador, mas isso pode ocorrer de diversas maneiras. Hipóteses como contração do gás que sobrou após o processo de formação da galáxia, estrelas supermassivas girando a enormes velocidades e possuindo um campo magnético intenso (conhecidas como spinars) ou mesmo buracos negros gigantes no núcleo de uma galáxia vêm sendo levantadas por astrônomos nas últimas décadas. A hipótese do buraco negro central é a mais aceita atualmente e justificaria, ao mesmo tempo, o tamanho compacto da fonte e sua intensa produção de energia, uma vez que um buraco negro com um bilhão de vezes a massa do Sol é capaz de gerar, durante a sua vida, uma energia equivalente a 100 milhões de vezes essa mesma massa. Ela pode inclusive explicar o porque de um quasar ser uma fonte de ondas de rádio, utilizando a hipótese de que o gás sugado para dentro do buraco negro pode, devido ao movimento espiralado semelhante ao da água correndo para dentro de um ralo de pia, atuar como um dínamo e produzir feixes de partículas que seriam ejetados em direções opostas. Esses feixes atuariam as regiões extensas mencionadas no começo dessa Seção.

A Tabela 5.1 contém uma lista de diversos objetos que, embora sejam também galáxias, foram classificadas separadamente em função de algumas características peculiares, mencionadas na segunda coluna da Tabela. A Figura 5.12 mostra uma imagem do quasar 3C 273 no óptico e em rádio.

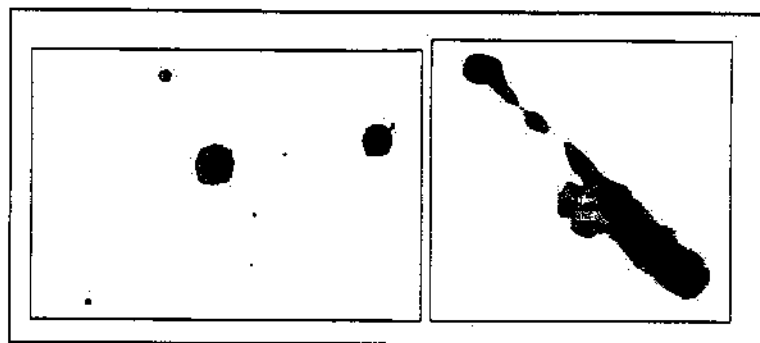


FIGURA 5.12 - IMAGEM À ESQUERDA: QUASAR 3C 273, OBSERVADO NO ÓPTICO. OBSERVE O JATO FRACO DE MATÉRIA SAINDO DA FONTE (PARTE INFERIOR DIREITA DA IMAGEM). À DIREITA, A MESMA FONTE MEDIDA EM RÁDIO, MOSTRANDO O NÚCLEO (ACIMA À ESQUERDA DA IMAGEM) E O FORTE JATO, COM O FORMATO DE UM TACO DE BEISEBOL.

Segundo Fred Hoyle, um famoso astrônomo britânico, o entendimento de porquê existem diferentes tipos de galáxias e como elas se formaram é um dos problemas mais importantes que existem hoje em astronomia. As propriedades das estrelas individuais que formam as galáxias é assunto abordado pela astrofísica e astronomia, enquanto o fenômeno da formação das galáxias toca a área da cosmologia. Pode-se dizer que o estudo das galáxias cria uma ponte entre a astronomia e astrofísica convencional de um lado e a cosmologia do outro.

TABELA 5.1 - DIVERSOS TIPOS DE GALÁXIAS ATIVAS E SUAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS.

GALÁXIAS ATIVAS	
Seyferts	Galáxias espirais com núcleo brilhante. Observação do núcleo mostra linhas de emissão e emissão em rádio
Galáxias N	Galáxias elípticas com núcleo brilhante. Algumas são radiofontes.
Objetos BL Lacertae	Provavelmente galáxias elípticas com núcleo muito brilhante. Observação do núcleo mostra uma emissão contínua sem nenhuma particularidade e polarização bastante variável.
QSOs	Objetos quase estelares semelhantes aos quasares, mas que não apresentam a emissão na faixa de rádio característica daqueles. Apresenta também desvios para o vermelho bastante grandes.

5.3 A ESCALA DE DISTÂNCIA COSMOLÓGICA

Todo o estudo da astronomia depende, fundamentalmente, de se conhecer a que distância se encontra o objeto estudado para, a partir daí, se determinar o seu brilho intrínseco e estudar as propriedades da radiação eletromagnética que chega até nós. Historicamente, os modelos cosmológicos concebidos pelo Homem envolviam a Terra, a Lua, o Sol, alguns planetas e as estrelas distantes e, desde o tempo da civilização grega tem-se feito determinações do tamanho da Terra e das distâncias Terra-Sol e Terra-Lua. O aparecimento dos telescópios, no séc. XVII, só veio aumentar a necessidade de se “mapear a estrada cósmica”, começando com a nossa vizinhança mais próxima.

A idéia, acredita-se que inicialmente formulada por Emanuel Kant (1724-1804), que nebulosas elípticas eram na verdade aglomerados enormes de estrelas, trouxe ao Homem a necessidade de entender melhor os diferentes objetos que ele avistava no céu. A descoberta dos aglomerados de galáxias e da expansão do Universo, no

séc. XX, acentuou esse problema. Os astrônomos resolveram, então, sistematizar as maneiras de determinar as distâncias até esses objetos, para poder realizar o “mapeamento cósmico”. Nessa Seção vamos estabelecer as bases para a afirmativa, feita na Seção 5.1.2, que diz que quanto maior a distância que um objeto se encontra de nós, maior a velocidade com que ele se afasta. A pergunta que vamos responder nessa Seção é como os astrônomos medem as distâncias aos objetos extragalácticos.

Conforme comentado nos capítulos anteriores, medidas de paralaxe são utilizadas para estimar as distâncias a estrelas próximas. Entretanto, os erros nessas medidas limitam o uso das paralaxes a distâncias inferiores a cerca de 100 anos-luz. Objetos como Cefeidas e estrelas novas podem ser usadas para medir distâncias na nossa Galáxia e até galáxias próximas. Eles possuem características bastante marcantes (tais como a intensidade do brilho ou a variabilidade regular) que permitem sua identificação em outra galáxia. A comparação é feita entre objetos do mesmo tipo, cuja paralaxe de um deles tenha sido determinada. Como a intensidade da luz emitida decai com o inverso do quadrado da distância entre fonte e o observador, é possível estimar a distância até objetos mais distantes.

Os métodos utilizando Cefeidas permitem medidas razoavelmente seguras de distâncias até cerca de 10 milhões de anos luz; a partir daí torna-se mais e mais difícil identificar Cefeidas individuais nas galáxias. Para atingir distâncias maiores é necessário utilizar outros calibradores padrão, cujo brilho e/ou tamanho angular intrínsecos conhecidos podem ser comparados ao brilho e tamanho de objetos semelhantes, mas localizados a distâncias maiores. Naturalmente, o truque nesse processo é ter certeza que escolhemos um critério adequado para reconhecer que observamos o mesmo tipo de objeto visto na nossa vizinhança. A Tabela 5.2 apresenta uma lista do que chamamos de “indicadores de distância”, ou seja, uma lista de calibradores padrão em função da distância.

TABELA 5.2 - MÉTODOS DE MEDIDAS DE DISTÂNCIA ÀS ESTRELAS.

OBJETO	MÉTODO
Estrelas próximas	Paralaxe trigonométrica
Aglomerado aberto (Híades)	Método de velocidade dos aglomerados de estrelas
Aglomerados abertos diversos	Ajuste da sequência principal às Híades
Cefeidas Clássicas	Relação período-luminosidade calibrado a partir das Cefeidas em aglomerados abertos
Estrelas RR Lirae	Métodos estatísticos de calibração da luminosidade
Aglomerados globulares	Estrelas RR Lirae como calibradores padrão
Cefeidas tipo II	Relação período-luminosidade calibrado a partir das Cefeidas em aglomerados globulares

Com o “mapeamento da estrada cósmica” até algumas centenas de milhões de anos-luz da Terra, uma nova questão aparece claramente aos astrônomos: por que existem algumas escalas de aglutinação preferenciais no Universo? Em outras palavras, por que o Universo segue uma hierarquia de distribuição de matéria, mas somente até um certo ponto?

5.3.1 HIERARQUIAS

Se tirarmos uma “radiografia” do Universo, veremos que sua estrutura é hierárquica. Além das galáxias em pares, observamos grupos (constituído de algumas poucos a algumas dezenas de objetos, num raio de cerca de 1 milhão de anos-luz – essa é a hierarquia mais comum, com a maior parte das galáxias sendo encontradas em grupos), aglomerados (alguns milhares de objetos, num raio de cerca de 10 milhões de anos luz) e superaglomerados (contém cerca de 100 a 1000 aglomerados num raio de aproximada-

mente 100 milhões de anos-luz). Encontramos uma espécie de parede de galáxias a uma distância de aproximadamente 450 milhões de anos-luz (Figura 5.13). Resultados recentes, mas ainda em discussão, mostram evidências de estruturas filamentosas até cerca de 1,5 bilhão de anos luz. Entretanto, a resposta conclusiva sobre se essas estruturas distantes 1,5 bilhão de anos-luz encontram-se espalhadas por todo o Universo visível somente virá nos próximos anos, quando levantamentos que cobrem todo o céu forem concluídos. Conforme mencionamos antes, olhar para os confins do Universo é a mesma coisa que observar regiões num passado remoto, perto da época em que o próprio Universo se formou.

O aglomerado mais próximo de nós é o aglomerado de Virgem, localizado a cerca de 50 milhões de anos-luz (na direção da constelação de Virgem). Ele contém cerca de 200 galáxias brilhantes, das quais 68% são espirais, 19% são elípticas e o resto é constituído de galáxias irregulares ou não classificadas. Localizado a cerca de 350 milhões de anos-luz, o aglomerado de Coma é o segundo mais próximo e contém alguns milhares de galáxias dos mais diversos tipos (Figura 5.14). Ao contrário de Virgem, em Coma a maioria das galáxias são elípticas ou S0 (cerca de 80%) e somente uns 15% são classificadas como espirais ou irregulares. Duas características são notáveis nos aglomerados ricos como Coma: a) a relativa ausência de galáxias espirais e b) a existência de uma ou duas supergigantes elípticas próximo ao centro do aglomerado.

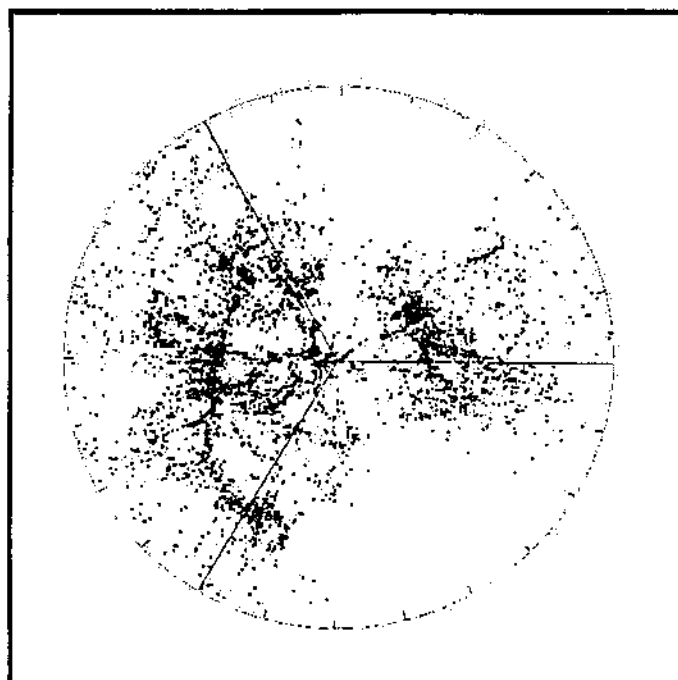


FIGURA 5.13 - A DISTRIBUIÇÃO DE GALÁXIAS NO UNIVERSO PRÓXIMO. A LINHA MAIS CONCENTRADA À ESQUERDA É CONHECIDA COMO A GRANDE MURALHA. O NOSSO SISTEMA SOLAR ENCONTRA-SE NO CENTRO DA CIRCUNFERÊNCIA.

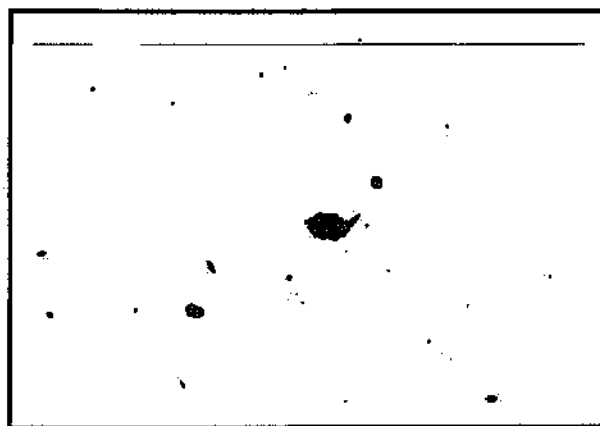


FIGURA 5.14 - AGLOMERADO DE COMA. NOTE-SE A PRESENÇA DE UMA GALÁXIA ESPIRAL NO CENTRO E, ABAIXO E À ESQUERDA, UMA GALÁXIA ELÍPTICA ANÃ (PÁGINA ANTERIOR).

5.3.2 DISTÂNCIAS TÍPICAS E A LEI DE HUBBLE

Estamos acostumados, no nosso dia a dia, a pensar e trabalhar com distâncias e medidas em termos das nossas próprias dimensões; quando precisamos pensar em coisas muito grandes e muito pequenas, dimensões menores que décimos ou centésimos de milímetros, ou milhares de quilômetros já são difíceis de quantificar mentalmente. Se pensarmos, então, nas distâncias típicas que envolvem os fenômenos astronômicos, veremos que elas encontram-se, muitas vezes, além da nossa realidade e mesmo da imaginação. Vamos montar uma Tabela (Tabela 5.3) que nos mostra, em termos gerais, as relações de tamanho entre objetos no Universo que conhecemos:

TABELA 5.3 - ESCALA DO UNIVERSO CONHECIDO (ADAPTADA DE FERRIS, PÁG. 225).

RAIO (METROS)	OBJETOS CARACTERÍSTICOS
10^{26}	Universo observável
10^{24}	Superaglomerados de galáxias
10^{23}	Aglomerados de galáxias
10^{22}	Grupos de galáxias
10^{21}	Nossa Galáxia (Via Láctea)
10^{18}	Nebulosas gigantes
10^{12}	Sistema Solar
10^{11}	Atmosfera exterior das estrelas gigantes vermelhas
10^9	Sol
10^8	Planetas gigantes (Júpiter, p. ex.)
10^7	Estrelas anãs, planetas como a Terra
10^5	Asteróides, núcleos de cometas
10^4	Estrelas de nêutrons
1	Seres humanos
10^{-2}	Molécula de DNA (eixo longo)
10^{-5}	Células vivas
10^{-9}	Molécula de DNA (eixo curto)
10^{-10}	Átomos
10^{-14}	Núcleos dos átomos pesados
10^{-15}	Prótons e nêutrons
10^{-35}	Escala de Planck; quantum de espaço

É interessante frisar que, em Cosmologia, trabalhamos com as maiores distâncias que um ser humano pode imaginar; algo como 26 ordens de grandeza maior que suas próprias dimensões! Não é de se admirar que, ao extrapolar as distâncias para valores cada vez maiores, as incertezas envolvidas sejam também grandes. Tipicamente, a incerteza sobre o tamanho do Universo e, indiretamente, sobre sua idade, vem dos problemas em se calibrar e extrapolar a distância até os objetos mais distantes. A Lei de Hubble, que descreve a velocidade de recessão das galáxias, pode ser usada para estimar as dimensões típicas do Universo em que vivemos.

Mas o que é, exatamente, a Lei de Hubble? Em 1923, o astrônomo Edwin Hubble começou um estudo de Cefeidas em “nebulosas espirais”, incluindo a nossa vizinha Andrômeda (a galáxia M31), visível a olho nu. Usando a relação período-luminosidade para as Cefeidas, ele calculou a distância que elas se encontravam da Terra, obtendo um valor de 800000 anos luz para Andrômeda e valores semelhantes para outros objetos. Os resultados mostraram que estes sistemas eram enormes conjuntos de estrelas e, definitivamente, encontravam-se fora da nossa Galáxia. Eles passaram a ser também chamados de galáxias e o conceito de “distância extragaláctica” estava criado.

Mas a mais importante descoberta de Hubble foi que as galáxias distantes se afastavam de nós e umas das outras. Seu resultado baseou-se numa relação linear entre a distância D das galáxias até nós (determinada pela relação período-luminosidade, por exemplo) e a velocidade v (determinada pela determinação do redshift das linhas espectrais observadas), escrita da forma $D = H_0 \cdot v$. A constante H_0 é a chamada constante de Hubble. Essas observações mostraram uma “recessão” sistemática e isotrópica, e foram confirmadas até distâncias extremamente grandes. A Figura 5.15 apresenta um diagrama com as primeiras observações feitas por Hubble e a extrapolação usando medidas de objetos mais distantes (olhe novamente a Figura 5.11). Hubble foi forçado a fazer sua descoberta passo a passo, utilizando Cefeidas, variáveis RR Lyrae e estrelas supergigantes para ir calibrando as distâncias até o aglomerado de Virgem.

Qualquer observador numa galáxia distante (num Universo em expansão) e que obedece a Lei de Hubble perceberá exatamente esse mesmo fenômeno. É como se o

próprio espaço estivesse se expandindo e um observador em qualquer parte dele visse a mesma expansão, em qualquer direção que olhasse. Na Seção seguinte vamos ver como a Lei de Hubble se combina com os outros “observáveis” mencionados na Seção 5.1 para formar a base do que conhecemos como o Modelo Cosmológico Padrão (doravante MCP).

5.4 COSMOLOGIA E O UNIVERSO EM QUE VIVEMOS

A Cosmologia é a ciência que estuda o Universo como um todo, buscando o entendimento de sua estrutura e evolução. Entre as ciências exatas, podemos certamente afirmar que ela é a mais exigente em termos de extrapolação de resultados e conceitos, já que as escalas de tempo e distância envolvidas nos problemas cosmológicos são da mesma ordem de grandeza da idade e tamanho do Universo que queremos observar.

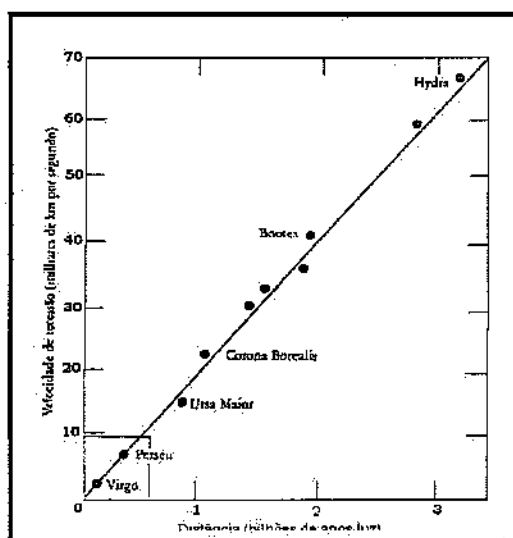


FIGURA 5.15 - A LEI DE HUBBLE É VÁLIDA POR TODO O UNIVERSO CONHECIDO. ESTE DIAGRAMA INCLUI OS DEZ MAIORES AGLOMERADOS DE GALÁXIAS. O QUADRADO NO CANTO INFERIOR ESQUERDO REPRESENTA AS GALÁXIAS OBSERVADAS POR HUBBLE AO DESCOBRIR A LEI (ADAPTADA DE FERRIS, PÁG. 157).

A Filosofia da Ciência sempre parte do princípio que a Natureza deve ser descrita por teorias esteticamente atraentes (baseadas em leis de conservação e princípios de simetria) e simples, no sentido de estar baseada num pequeno conjunto de leis de carácter geral (o exemplo da Mecânica Clássica, do Eletromagnetismo e da Termodinâmica Clássica vêm imediatamente à memória). No caso da Cosmologia, a situação é em parte semelhante. A principal diferença vem do fato de a Cosmologia ser uma ciência interdisciplinar, conforme mencionado no início deste Capítulo. A busca atual vai no sentido de uma teoria cosmológica convincente, do ponto de vista teórico (deve satisfazer as leis da Física na qual ela se baseia), e condizente com a enorme gama de observações acumuladas nos últimos anos. Por fim, ela deve ter poucos parâmetros livres (quantidades físicas cujo valor não é bem determinado) e uma capacidade de previsão, de modo que possamos fazer e verificar previsões da teoria.

Ao falarmos de galáxias, na Seção 5.2, descrevemos suas formas, os principais tipos observados e as principais idéias sobre formação e evolução. O material dessa apostila vem sendo apresentado, de uma certa forma, em função da *escala de distância* mencionada na Seção 5.3: passamos da astronomia do dia-a-dia para o Sistema Solar, estrelas e galáxias. Nessa Seção serão discutidas as maiores escalas de distância em que a matéria consegue se agrupar. Elas são também as maiores observadas pelo homem e constituem o que chamamos de “Universo Observável”. Até agora apresentamos uma galáxia como um elemento isolado e discutimos suas propriedades. Mas veremos que, da mesma forma que encontramos na natureza sistemas estelares binários e aglomerados estelares, encontraremos galáxias binárias e aglomerados de galáxias.

Ao estudarmos a distribuição de matéria no Universo, da forma apresentada neste capítulo, por exemplo, partimos dos menores constituintes para o “todo”. É fácil perceber que existe uma hierarquia no Universo, em que matéria vai se juntando para formar uma determinada estrutura que, numa escala maior, comporta-se como uma pequena parte que será juntada às outras para formar uma estrutura ainda maior e assim sucessivamente... mas será que esse processo tem um fim ou o Universo comporta-se como uma repetição infinita de uma mesma “célula” básica? Esse é um dos problemas

mais importantes que a Cosmologia pretende solucionar. Uma abordagem pouco convencional sugere que a distribuição de matéria e as hierarquias podem ser representadas por um fractal, uma vez que existe a repetição de células (estrelas, aglomerados, galáxias e aglomerados de galáxias). Entretanto, a determinação precisa da escala de repetição das células e da transição do Universo fractal para o Universo tradicional tem apresentado dificuldades grandes para os defensores dessa abordagem.

No estudo do movimento das estruturas em grande escala, notamos que a quantidade de matéria necessária para que aglomerados tenham o comportamento dinâmico observado é algumas vezes maior do que a estimada a partir da emissão de radiação visível. A densidade de matéria luminosa (ρ_{Lum}) é cerca de 10% da densidade típica do Universo, e a pergunta que surge é: por que as medidas dinâmicas indicam uma quantidade de matéria diferente das obtidas a partir das medidas da luz emitida pelas galáxias e aglomerados? Esse problema é conhecido como o problema da “massa faltante”.

Chamamos de densidade crítica (ρ_c) ao valor necessário para que o Universo continue a se expandir, mas desacelerando a ponto de, num futuro distante, a expansão finalmente parar. ρ_c pode ser calculado teoricamente, a partir das equações da Teoria da Relatividade Geral, e é aproximadamente igual a $10^{-29} \text{ g.cm}^{-3}$. Os valores típicos para ρ_{Lum} são da ordem de 0,01 a 0,1 ρ_c . Essa diferença, não explicada pelas medidas dinâmicas das estruturas, deu origem à hipótese da *matéria escura*.

Nesse ponto podemos nos perguntar: mas o que é essa matéria escura? Devemos justificar a afirmação, feita na Introdução, que praticamente desconhecemos de que tipo de matéria o Universo é feito. Definimos matéria escura como todo tipo de matéria que não pode ser vista por meio de emissão de radiação eletromagnética. Somente percebemos sua presença através dos efeitos da gravidade. A existência de matéria escura, conforme mencionados nos parágrafos anteriores, é capaz de explicar a diferença entre a quantidade de matéria observada por emissão de radiação magnética e a que parece existir, a partir de evidências nos movimentos das galáxias. Mas quem seriam os candidatos a essa matéria escura? A lista é grande, mas vamos dividi-la em

matéria bariônica (constituída de prótons e nêutrons) e não-bariônica. A matéria escura bariônica tem como candidatos principais protoestrelas que não chegaram a iniciar o ciclo de reações nucleares, anãs marrons, que praticamente não estão mais emitindo nenhum tipo de radiação e buracos negros, cuja existência somente podemos determinar de maneira indireta. Os candidatos não bariônicos podem ser uma série de partículas previstas por teorias da física de partículas e grande unificação. Os candidatos principais nesse caso são os neutrinos (discutidos mais à frente).

Definimos um parâmetro cosmológico importante, que é a razão entre a densidade observada e a densidade crítica, $\Omega = \rho/\rho_c$ e que será útil na nossa discussão sobre matéria escura. Falaremos mais sobre Ω ao final da Seção 5.4.

Por outro lado, sabemos que o Universo está em expansão e que, no passado, ele devia estar num estado em que a matéria era muito mais quente e densa e todos os constituintes encontravam-se em equilíbrio térmico. Entretanto, ao olharmos para o céu vemos um Universo totalmente diferenciado, com vazios em alguns lugares e enormes concentrações de matéria em outros. Como o Universo passou de um estado totalmente desorganizado (um "plasma primordial") para esse estado estruturado que vemos hoje, aparentemente violando a Segunda Lei da Termodinâmica? Essas são algumas das perguntas que vamos tentar responder na Seção 5.4.

5.4.1 UM QUADRO CÓSMICO...

A Figura 5.16 mostra uma fatia do Universo com a Terra, nos dias de hoje, localizada no vértice das duas regiões em forma de pizza. Ela contém os tópicos mencionados na Tabela 5.4 e mais alguns outros eventos, formando um "quadro cósmico", justificando o título da Seção. Conforme olhamos para pontos mais e mais longe do vértice, olhamos para objetos mais e mais distantes de nós e, como consequência, cada vez mais jovens. Propriedades dos objetos mais próximos podem ser medidas diretamente com os equipamentos disponíveis atualmente para os astrônomos, de modo que a Figura 5.16 é mais precisa no vértice. À medida que nos afastamos, nosso conhecimento baseia-se

menos nas observações diretas e mais nos cálculos e no conhecimento que temos sobre as leis da Física.

As galáxias brilhantes mais próximas permitem um estudo mais detalhado de suas propriedades. À medida que olhamos para objetos mais distantes, fica mais difícil medir a radiação eletromagnética emitida e por essa razão astrônomos e cosmólogos sempre estão desenvolvendo instrumentos mais sofisticados. Olhando mais fundo no Universo, é possível determinar a época de nascimento e a evolução das galáxias e a sua distribuição no espaço — a chamada estrutura em grande escala no Universo.

Avançando ainda mais, imaginamos um período em que as galáxias e as primeiras estrelas estavam se formando. Não sabemos exatamente em que época isso aconteceu, porque temos muito pouca informação sobre esse período do Universo, mas sabemos que isso deve ter acontecido quando o Universo tinha entre 10 milhões e 1 bilhão de anos de idade; nada sabemos sobre a taxa de formação ou a distribuição de galáxias naquela época. Em contraste, os cosmólogos sabem muito mais sobre o Universo mais jovem, com cerca de 300 mil anos de idade! Esse período é explorado a partir das informações que extraímos do estudo da RCF. À medida que o Universo foi se expandindo e esfriando, a RCF também esfriou, atingindo a temperatura atual de 2,726 graus K (ou seja, aproximadamente $-270,2$ graus Celsius). Quando o Universo tinha cerca de 300 mil anos, a temperatura da RCF era da ordem de 3000 graus K (temperatura de ionização do hidrogênio) e aos 10 milhões de anos de idade a temperatura era de 300 K (temperatura média na superfície da Terra).

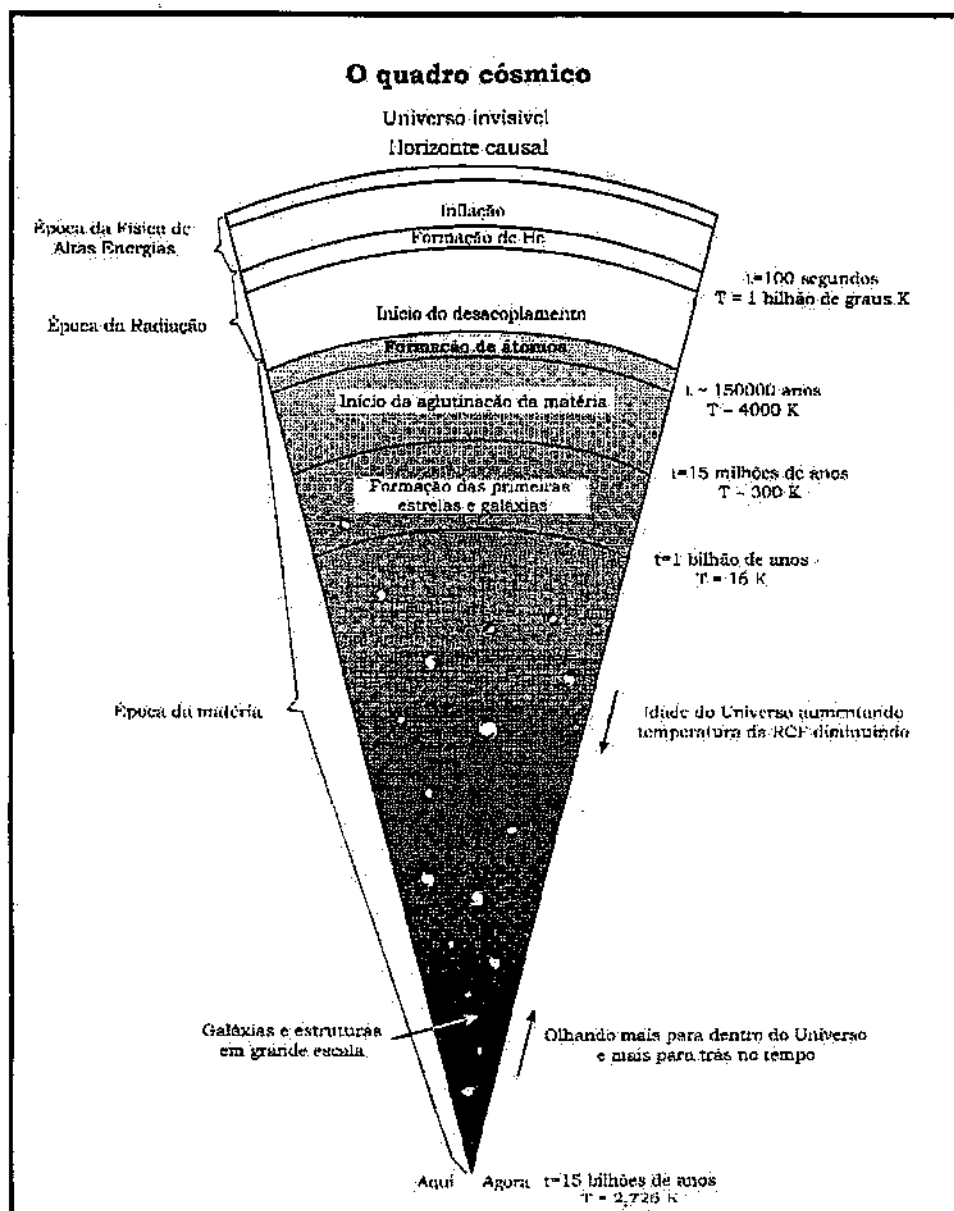


FIGURA 5.16 - FOTOGRAFIA EM CORTE DA HISTÓRIA DO UNIVERSO. REGIÕES MAIS PRÓXIMAS DO VÉRTICE ENCONTRAM-SE MAIS PRÓXIMAS DE NÓS NO TEMPO.

Na época em que a RCF foi criada, o Universo era 1000 vezes menor do que hoje, 10^9 vezes mais denso e 1000 vezes mais quente do que hoje. Ele estava “banhado” de luz visível, enquanto hoje encontra-se “banhado” em microondas. Se existíssemos naquela época, a comparação adequada é que seria como sentar no interior do Sol! A radiação que chegaria até nós seria extremamente brilhante em todas as direções.

TABELA 5.4 - EVENTOS IMPORTANTES NA HISTÓRIA DO UNIVERSO.

FATOR DE ESCALA R	TEMPO A PARTIR DO BIG BANG	EVENTOS	TEMPERATURA DA RADIAÇÃO (K)	DENSIDADE DA MATÉRIA (g.cm ⁻³)
1	2×10^{10} anos	Agora	3	10^{-30}
1/1500	10^7 anos	Nessa temperatura todo o hidrogênio do Universo encontrava-se ionizado	4000	10^{-20}
1/1000- 1/10000	$2-20 \times 10^6$ anos	Quantidades iguais de matéria e radiação.	3000-30000	$10^{-21}-10^{-18}$
$1/10^9$	10 minutos	Dissociação do núcleo dos átomos devida à alta temperatura da radiação	3×10^9	10^{-3}
$1/(3 \times 10^9)$	1 minuto	Criação de pares elétron-pósitron a partir do campo de radiação	10^{10}	0,03
$1/10^{13}$	$\sim 10^{-5}$ segundos	Criação de pares bárion-anti-bárion a partir do campo de radiação	$\sim 10^{13}$	10^9

5.4.2 O MODELO COSMOLÓGICO PADRÃO: O BIG BANG

Até cerca de 1950, a Cosmologia era uma ciência eminentemente teórica, com pouco suporte observacional e praticamente nenhuma atividade experimental que pudesse apoiar os modelos de Universo então vigentes. Esses modelos possuíam as mais diversas características e praticamente todos evoluíram a partir das soluções das equações que Albert Einstein propôs para descrever o movimento de corpos em referenciais acelerados: a chamada Teoria da Relatividade Geral, ou TRG.

Recentemente, alguns fatos experimentais, em conexão com a TRG, criaram um paradigma de modelo cosmológico, o Modelo Cosmológico Padrão (MCP). Embora criticado por alguns cientistas, este modelo é o que melhor descreve o Universo que observamos e baseia-se nos seguintes pontos:

- Não há região ou observador no espaço que ocupe uma posição preferencial em relação a outra qualquer. Essa afirmativa é conhecida como o Princípio Cosmológico;
- O Universo é homogêneo e isotrópico em escalas suficientemente grandes e;
- A existência da radiação cósmica de fundo em microondas (doravante RCF, descoberta por A. Penzias e R. Wilson, em 1965), a abundância de determinados elementos químicos leves (hidrogênio, Deutério, hélio e Lítio, cuja primeira estimativa foi feita por R. A. Alpher e R. Hermann, em fins dos anos 40) e a observação da velocidade relativa de afastamento de galáxias distantes (descoberta por E. Hubble, em 1929), são fatos observacionais e servem como pedra de base do MCP.

O item 1 foi enunciado por Nicolau Copérnico em fins do século XV e vem sendo utilizado na imensa maioria dos modelos cosmológicos desde então. Como praticamente todos os processos observados na evolução das estrelas e galáxias podem ser descritos em termos da Física conhecida, acredita-se que as leis que descrevem os fenômenos físicos da nossa Galáxia são as mesmas em qualquer parte do Universo. Essa crença vem do fato de podermos observar e descrever fenômenos que ocorrem em galáxias distantes com exatamente o mesmo formalismo matemático usado para descrever fenômenos locais.

O item 2 vem sendo estudado em detalhes nos últimos anos e verificado com base em resultados de diversos levantamentos de distâncias de galáxias (os “redshift surveys”, feitos em instituições como o Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics – CfA. Ver, por exemplo, Figura 5.13). A homogeneidade e isotropia do Universo começam a ser verificadas a partir de distâncias da ordem de 600 milhões de anos luz ($3,08 \times 10^{26}$ cm,

que equivalem a 3 bilhões de trilhões de quilômetros). Até distâncias dessa ordem ainda são observados diversos tipos de estrutura, tais como vazios, paredes e estruturas filamentosas. Desse ponto até o ponto onde se formou a RCF (9 bilhões de anos luz, equivalentes a 100 bilhões de trilhões de quilômetros) existe uma lacuna de informações, mas cálculos teóricos sugerem que esse foi o intervalo de tempo necessário para que perturbações gravitacionais evoluíssem para formar as primeiras galáxias do Universo.

O item 3 apresenta as evidências observacionais que sustentam o MCP, sendo que a abundância dos elementos químicos nos traz informações sobre o processo da nucleossíntese primordial, a RCF reflete o estado de equilíbrio termodinâmico no Universo jovem e a velocidade de recessão das galáxias distantes pode esclarecer pontos obscuros sobre diversos parâmetros cosmológicos, tais como a constante de Hubble e o parâmetro de desaceleração.

O cenário previsto pelo MCP, baseado nos pontos acima, sugere que o Universo foi criado há cerca de 10-15 bilhões de anos, a partir de um estado de densidade, temperatura e pressão infinitas. Esse processo é conhecido como BIG BANG (Grande Explosão), e, considerando-se esse o *instante zero*, o Universo começou a expandir-se e resfriar-se. Todas as referências a intervalos de tempo são feitas, em geral, supondo-se que o instante inicial foi o BIG BANG ($t = 0$). Até cerca de 0,01 segundos, a temperatura era muito alta e havia formação e aniquilação incessante de pares de partículas elementares. Após a temperatura cair para valores abaixo de 1 bilhão de graus K, a produção e aniquilação de pares e as reações nucleares cessaram, deixando como resultado elétrons, prótons e nêutrons (nossos conhecidos, que formam a matéria comum que constitui a Terra e as moléculas orgânicas a partir das quais nosso organismo é formado). Também restaram fótons e neutrinos. Estes últimos são partículas extremamente difíceis de serem detectadas, possuindo massa extremamente pequena (cujo valor foi recentemente estimado), e carga elétrica nula.

A combinação de prótons e nêutrons deu origem aos primeiros núcleos de elementos químicos do Universo: hidrogênio (H), deutério (D), hélio (He) e lítio (Li). Com o Universo em expansão e conseqüente resfriamento, a temperatura atingiu o valor de 3000 K, 300 mil anos após a explosão. Nesse momento, prótons e elétrons - que encontravam-se livres até então - começaram a combinar-se para formar átomos de hidrogênio e o plasma de matéria e radiação deixou de existir. Com a combinação, o processo de interação entre fótons e elétrons, conhecido como espalhamento Thomson, tornou-se insignificante e o Universo tornou-se transparente à radiação (Figura 5.17). A trajetória de um fóton, antes limitada devido às colisões sucessivas com os elétrons livres, passou a ser da mesma ordem de grandeza do Universo. Devido ao processo de expansão, a temperatura dos fótons da RCF vem decrescendo proporcionalmente à taxa de expansão, mas mantendo exatamente as mesmas características. Como já dissemos, hoje sua temperatura é de 2,726 graus K, e é praticamente uniforme em todo Universo.

Como a variação de temperatura é inversamente proporcional à taxa de expansão, podemos estimar o aumento relativo do tamanho do Universo nesse período. Se a temperatura na época do desacoplamento entre a matéria e a radiação era cerca de 3000 K, e a temperatura atual é da ordem de 3 K (a temperatura equivalente de um objeto imerso em hélio líquido), o fator de decréscimo foi 1000 ($3000/3$). Logo, o Universo hoje é mil vezes maior que na época da recombinação. Por outro lado, a partir dessa época a matéria estava livre para condensar-se em estruturas que evoluíram nas galáxias que hoje observamos, já que a pressão exercida pela interação dos fótons não mais estava presente. Os átomos puderam então se associar, aumentando a atração gravitacional e o colapso das nuvens de hidrogênio primordial, criando as primeiras estruturas do Universo.

Uma das sugestões mais atraentes (e também a mais simples) para explicar esse processo de formação é que a gravidade foi atraindo matéria para regiões que eram inicialmente um pouco mais densas que suas vizinhanças. Durante milhões de anos, esse processo foi acontecendo, sem interrupção, e foi comprimindo essas regiões porque, à medida que mais matéria ia sendo trazida, a gravidade tornava-se mais e mais forte, até

que galáxias e outros objetos apareceram. Eles somente resistem a um colapso completo (a exemplo de um prédio que “implode”) devido a seus movimentos de rotação e movimentos internos.

5.4.3 ESTRUTURA E EVOLUÇÃO

Conforme mencionamos anteriormente, observamos que as galáxias distantes estão se afastando umas das outras e que, conseqüentemente, o Universo está em expansão. Isso nos leva a pensar que ele teve, então, um começo. Nosso primeiro desafio é medir seu tamanho e idade. A constante de Hubble nos permite calcular essas duas grandezas com uma incerteza de aproximadamente 20%. Entretanto, para que tenhamos certeza de que realmente estamos “entendendo” a História Cósmica, as incertezas nessas medidas devem ser da ordem de 1%. Devemos também medir diretamente a forma e a geometria do Universo. Será ele plano, como afirmam os físicos? Ou ele é curvo como a superfície de uma esfera?

Há cerca de 30 anos atrás, dois astrônomos dos Laboratórios Bell, nos EUA, descobriram por acaso uma emissão de rádio distribuída de forma praticamente uniforme por todo o céu. Essa emissão é a chamada Radiação Cósmica de Fundo em Microondas (RCF) mencionada na Seção 5.1. Essa radiação é considerada como o resíduo de uma época em que o Universo era muito mais quente e denso, a época do BIG BANG, onde a História do nosso Universo começa, cerca de 10 a 15 bilhões de anos atrás. A Cosmologia tenta traçar um perfil da evolução do Universo dessa época densa e quente, quando o Universo era composto de uma mistura de gás e radiação em equilíbrio térmico, para o estado extremamente complexo e diversificado que vemos hoje, com galáxias, estrelas e planetas concentrados em certas partes do céu e regiões vazias em outras. As estruturas parecem ter sido formadas a partir de pequenos desvios do equilíbrio no Universo jovem e a força da gravidade, agindo sobre a misteriosa matéria escura que mencionamos anteriormente, fez com que regiões mais densas (com mais matéria) se expandissem mais lentamente e se aglutinassem para formar galáxias que, por sua vez, se juntaram para formar os grupos, aglomerados e

superaglomerados mencionados nas seções 5.2 e 5.3, de acordo com a Figura 5.9.

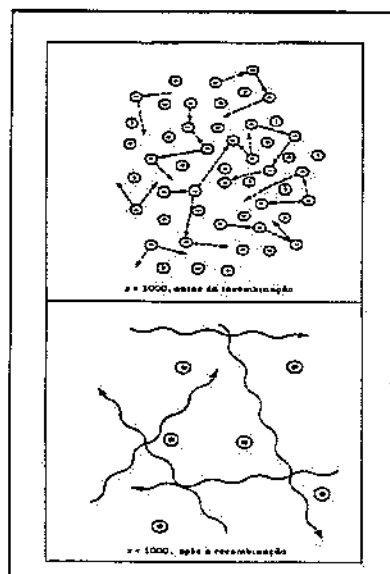


FIGURA 5.17 - O DESACOPLAMENTO DA MATÉRIA COMUM DA RADIAÇÃO. NA FIGURA SUPERIOR, O ESPALHAMENTO THOMSON OBRIGA OS FÓTONS A PERCORREREM UM CAMINHO ALEATÓRIO. APÓS A RECOMBINAÇÃO, OS FÓTONS PODEMS SER PROPAGAR LIVREMENTE PELO UNIVERSO. (FONTE: ADAPTADA DE SHU, PÁG. 394).

Ainda assim pouco sabemos sobre esse processo de evolução... Quanto tempo depois do BIG BANG a matéria levou para se aglutinar em galáxias? E quanto tempo foi gasto na formação das primeiras estrelas e planetas? O processo aconteceu das pequenas para as grandes estruturas, com estrelas e aglomerados de estrelas se formando primeiro e se juntando para formar galáxias (uma evolução hierárquica conhecida como “bottom-up”), ou aconteceu ao contrário, com os enormes superaglomerados se fragmentando em nuvens menores que formaram estruturas do tamanho das galáxias (conhecido também como “top-down”)? A RCF interagiu com a matéria pela última vez cerca de 300 mil anos após o começo do Universo. Observações da RCF indicam que a matéria encontrava-se uniformemente distribuída no Universo, mas que apresentava pequenas distorções, a partir das quais as gigantescas estruturas que vemos no céu se formaram.

O destino do Universo será determinado pela sua densidade média, que está, por sua vez, ligado à geometria e à taxa de expansão. Se a densidade for baixa, o Universo seguirá eternamente no processo de expansão em que se encontra atualmente. Entretanto, se a densidade for maior do que a densidade crítica, a força da gravidade será capaz de frear e mesmo reverter esse processo de expansão, fazendo com que o Universo se contraia e, eventualmente, termine sua “vida” numa grande contração. Como mais de 90% da massa do Universo é constituída da chamada matéria escura, para conhecer o destino do Universo – e o nosso também – é necessário determinar a quantidade de matéria escura que existe no Universo e qual é a sua natureza.

5.5 O SUPORTE OBSERVACIONAL DO BIG BANG

Embora a intensidade da RCF seja extremamente uniforme em todo o céu, a distribuição local de galáxias é extremamente irregular, com flutuações na densidade de galáxias por volume sendo extremamente alta. Mapas dessa distribuição revelam um padrão notável de estruturas semelhantes a filamentos conectando concentrações de galáxias entremeadas com regiões vazias e aproximadamente esféricas. As Figuras 5.13 (discutida na Seção 5.3.1) e 5.18 são resultado de anos de levantamentos de espectros durante as décadas de 70 e 80, com telescópios relativamente modestos. Essa distribuição de galáxias, filamentos e vazios é conhecida como estrutura em grande escala.

5.5.1 AS ESTRUTURAS EM GRANDE ESCALA

Face ao que já comentamos sobre as flutuações de densidade primordial, não é surpresa notarmos que galáxias existam, em sua maioria, em grupos e aglomerados. Galáxias e estruturas em grande escala são consequência das mesmas condições a que o Universo jovem estava sujeito, no início de sua vida. O que surpreendeu os astrônomos nas décadas de 80 e 90 não foi a existência, mas o tamanho das estruturas. Vazios típicos tem tamanhos de até 200 milhões de anos luz e uma estrutura conhecida como “A

Grande Muralha”, que se estende por mais de 500 milhões de anos luz e é a maior estrutura identificada no Universo até a presente data (note a faixa filamentar no lado esquerdo da Figura 5.13).

Hoje observam-se evidências de que existem estruturas além da “Grande Muralha” (até cerca de 3-4 bilhões de anos-luz), embora elas sejam poucas e observadas em pequenas regiões do Universo (em termos de distribuição angular). É possível que essas estruturas realmente estejam se formando num instante anterior ao que se pensava (cerca de 500-600 milhões de anos-luz). De qualquer maneira, a transição entre a região homogênea do Universo (caracterizada pela RCF) e a região irregular (caracterizada pelas estruturas em grande escala) acontece em algum instante/tempo além de 3-4 bilhões de anos-luz. As distâncias envolvidas no estudo das estruturas em grande escala variam de alguns milhões (tamanhos típicos de pequenos grupos de galáxias) a alguns bilhões de anos luz (distâncias várias vezes maiores do que a extensão da “Grande Muralha”). A combinação de medidas dessas estruturas e das flutuações de temperatura na RCF são as ferramentas mais poderosas de que dispomos hoje para estudar o Universo jovem e responder as questões formuladas no começo desse capítulo. A amplitude das flutuações de densidade em diferentes escalas de distância (caracterizadas pelas galáxias solitárias, grupos, aglomerados e superaglomerados) e seu crescimento posterior contém informações importantes sobre a natureza e a quantidade de matéria escura no Universo.

5.5.1.1 COMO MAPEAR AS ESTRUTURAS?

Fazer mapas de galáxias em três dimensões requer um conhecimento de quão distantes os objetos se encontram de nós, conforme mencionado na Seção 5.3. Isso é feito a partir da determinação dos redshifts: quanto maior o redshift, maior a velocidade e mais distante o objeto se encontra de nós. Estamos atualmente caminhando para catálogos de galáxias com redshift conhecido contendo cerca de um milhão de objetos, enquanto há 20 anos atrás, o número médio de galáxias com redshift conhecido era de apenas 2700.

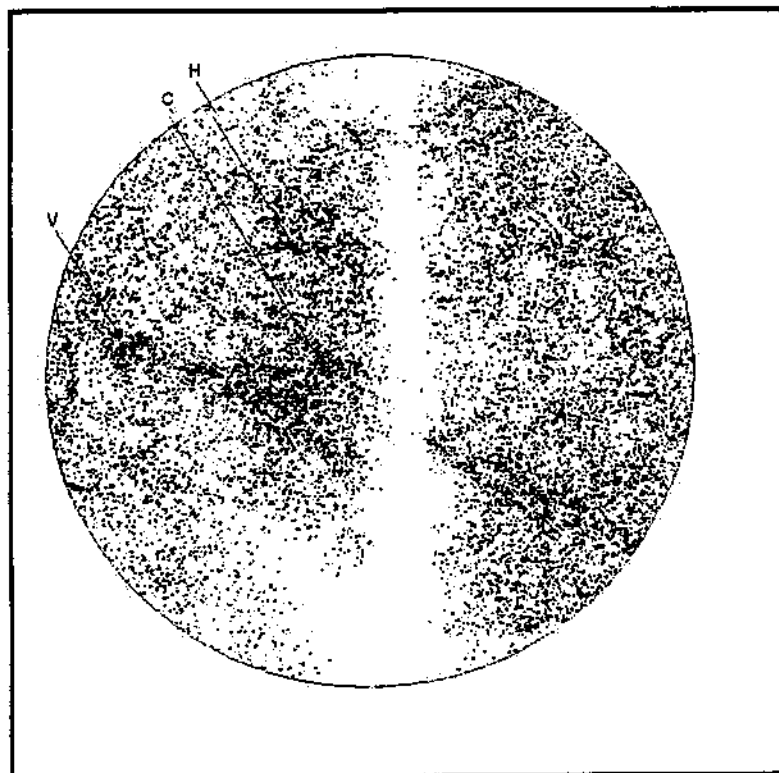


FIGURA 5.18 - DISTRIBUIÇÃO DAS GALÁXIAS NA NOSSA VIZINHANÇA. OS AGLOMERADOS DE VIRGEM (V) E HIDRA-CENTAURO (H E C) PARECEM ESTAR SE MOVENDO NA DIREÇÃO DE UM “GRANDE ATRATOR”, PARTE DO QUAL PODE SER A GRANDE AGREGAÇÃO DE MATÉRIA A DIREITA DE VIRGEM E ABAIXO DE CENTAURO.

O objetivo de mapear essas estruturas é ir tão fundo em distância de modo a mapear galáxias perto das mesmas regiões em que a RCF foi criada. Isso será equivalente a tirar fotos do Universo em diferentes épocas e mapear então a evolução desde a época do desacoplamento entre a matéria e a radiação, quando o Universo ainda era homogêneo e isotrópico, até períodos mais recentes, quando o Universo já estava muito mais diferenciado e irregular.

A teoria por trás do estudo das estruturas em grande escala baseia-se na solução de equações que descrevem a evolução do Universo. Os cálculos supõem que o Universo

jovem possui flutuações aleatórias, como previsto por diferentes parâmetros cosmológicos e tipos de matéria escura. As equações que descrevem o acoplamento gravitacional e outros processos físicos relevantes são resolvidas numericamente por supercomputadores. Os cálculos mostram que as flutuações crescem, conforme previsto nas idéias que envolvem instabilidades gravitacionais. Os resultados são então comparados com as observações feitas, ajustes são feitos nos modelos que os computadores produzem e os cálculos são refeitos. A análise cuidadosa dessas comparações também é capaz de ajudar a selecionar valores confiáveis para a natureza e a quantidade da matéria escura no Universo.

As medidas de redshifts e dos fluxos de matéria observados ao mapearmos as velocidades das estruturas em grande escala têm a mesma causa. Combinadas com as medidas da RCF feitas pelo satélite COBE (COsmic Background Explorer), que será mencionado na Seção 5.5.2, esses resultados vão quantificar as amplitudes das flutuações em praticamente todas as escalas de distância que nos interessam. As estimativas de massa feitas a partir das medidas de aglomerados de galáxias sugerem que a densidade do Universo é menor que a densidade crítica por um fator 10. Esse resultado não foi questionado ou modificado desde sua descoberta, há cerca de 20 anos. Por outro lado, dados recentes de fluxo em grande escala, que medem massa em escalas 30 vezes maior do que a escala de aglomerados, parece indicar que a densidade pode ser da ordem da densidade crítica.

Essa contradição indica algo sobre a distribuição da matéria escura... Parece que ela pouco se aglutina em pequenas escalas de distância (alguns milhões de anos luz, escala típica de galáxias), mas se concentra intensamente em escalas de centenas de milhões de anos luz: a escala das maiores estruturas. Essa contradição ainda não tem explicação nem se sabe se os modelos atuais que tentam explicar a formação de estruturas serão capazes de explicar todas as observações, das escalas de galáxias até as escalas da RCF.

As perguntas a serem respondidas pelo estudo das estruturas em grande escala são ainda as mesmas:

- qual é a natureza e a distribuição da matéria escura?
- Qual é a densidade média de matéria do Universo?
- Essa densidade é maior, menor ou igual à densidade crítica?
- Onde e quando as primeiras estruturas se formaram?

A combinação das medidas mencionadas acima com o que se espera entender da RCF, discutida a seguir, formam o conjunto de informações mais detalhado e importante existente atualmente para estudar a origem e a evolução do Universo.

5.5.2 A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO EM MICROONDAS

Falamos muito sobre a RCF até agora, mas ainda não explicamos exatamente o que ela é, nem entramos nos detalhes sobre a sua importância para a Cosmologia. Já dissemos que ela foi descoberta em 1964 por Arno Penzias e Robert Wilson e foi imediatamente associada com o Universo jovem. Ela é uma forte evidência de que o Universo, em uma época qualquer no passado, era muito mais compacto e quente do que é hoje. Para produzir uma radiação com as características da RCF, o Universo deveria ser completamente diferente do que vemos hoje nos céus. Nessa época não era possível a existência de planetas, estrelas e galáxias; ele deveria estar completamente preenchido por um “plasma” de radiação e partículas elementares: o “plasma primordial”.

A idade do Universo é estimada entre 10 e 15 bilhões de anos e, desde sua criação, ele vem se expandindo sem parar. A RCF, formada cerca de 300 mil anos após a criação, foi-se resfriando por causa da expansão e hoje a temperatura medida é de 2,726 graus K. Essa temperatura corresponde à faixa de microondas no espectro eletromagnético e vem de todas as regiões do céu. Além disso, a potência dessa emissão é distribuída num grande intervalo de frequências, ao invés de estar concentrada numa única frequência, como acontece com um transmissor de rádio normal.

O estudo da RCF é feito medindo-se essa emissão ao longo desse intervalo e em todo o céu. Das medidas feitas desde sua descoberta (há mais de 30 anos atrás), acreditamos

que ela tem praticamente as mesmas características de quando foi criada, exceto pela temperatura, que vem abaixando *por causa da expansão do Universo*. A evolução posterior do Universo, durante o processo de formação de estruturas não afetou a RCF. Ela é considerada um resíduo cósmico praticamente intocado, e nos dá uma excelente oportunidade de estudar os detalhes do Universo jovem. Para que os cosmólogos sejam capazes de entender a origem e a evolução das estruturas que vemos hoje no Universo, é essencial que saibam como eram as condições físicas que existiam naquela época; as características da RCF são diretamente dependentes dessas condições, de modo que estudar a RCF certamente ajuda a entender melhor a física do Universo jovem.

5.5.2.1 O QUE APRENDEMOS AO ESTUDAR A RCF?

O espectro da RCF pode ser entendido como um conjunto de medidas da intensidade da RCF em diferentes frequências. O melhor resultado até a presente data foi obtido pelo satélite COBE e pode ser visto na Figura 5.19. O MCP prevê que a RCF deve ter um espectro bem peculiar, conhecido entre os físicos como espectro de corpo negro, tem uma forma bem definida que depende somente da temperatura do corpo emissor. Essa é a primeira característica marcante da RCF. O espectro de corpo negro a temperatura de 2,726 graus K tem um pico na frequência aproximada de 120 GHz; o espectro de corpo negro do Sol, cuja temperatura é de 6000 K, possui o pico numa frequência correspondente à luz visível. A explicação mais simples sobre o espectro de corpo negro da RCF é que o Universo todo se encontrava a uma mesma temperatura durante os primeiros instantes de sua história. O espaço foi todo preenchido rapidamente com gás quente e partículas, todos à mesma temperatura, mas que se expandiam e resfriavam rapidamente.

Os modelos teóricos da história térmica do Universo vêm se desenvolvendo paralelamente às medidas do espectro. O ajuste preciso das medidas ao espectro de corpo negro teórico coloca limites muito rígidos sobre as possibilidades de processos físicos que podem ter acontecido no Universo jovem. Por exemplo, um reaquecimento do Universo causado por liberação de enormes quantidades de energia, previsto em alguns modelos alternativos de formação de galáxias, é uma hipótese que está completamente descartada depois das medidas do COBE, uma vez que, se isso acontecesse, a forma do espectro de corpo negro seria bastante distorcida.

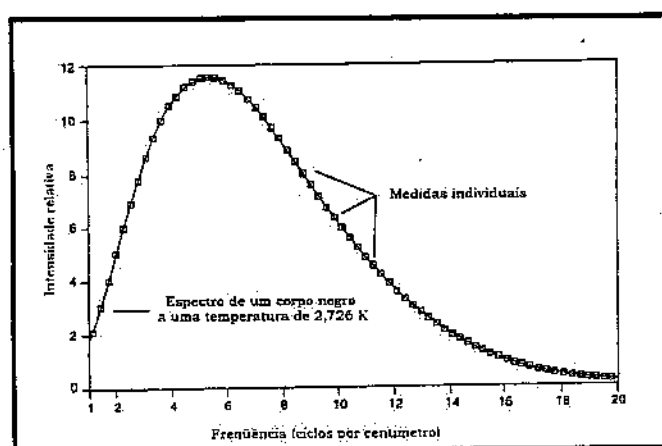


FIGURA 5.19 - ESPECTRO DA RCF MEDIDO PELO SATÉLITE COBE. O PICO ENCONTRA-SE PRÓXIMO DA FREQUÊNCIA DE 6 CPS E TEM A FORMA DE UM CORPO NEGRO A UMA TEMPERATURA DE 2,7 K.

A segunda característica importante da RCF é a existência de pequenas variações na temperatura de 2,726 K de lugar para lugar no céu. As medidas dessas variações, também chamadas de medidas de anisotropias, contém informação sobre a distribuição da matéria no Universo jovem. Os cosmólogos estimaram que a intensidade dessa variação é de, aproximadamente, uma parte em 10000. Como um exemplo, podemos comparar essa amplitude a encontrar pequenas ondulações de 1 cm de altura no pico de Agulhas Negras, em Itatiaia, supondo que ele fosse perfeitamente liso!!! Apesar de pequenas, acredita-se que elas são as sementes das estruturas extremamente complexas que vemos no céu atualmente.

A idéia da instabilidade gravitacional provavelmente explica a maior parte dos objetos que os astrônomos vêem no céu hoje, mas ela requer pequenas flutuações de densidade inicial para iniciar o processo. Uma vez que a expansão do Universo retarda muito a formação de instabilidades (como visto na Figura 5.8), essas sementes para a formação de estrutura já deviam existir muito antes do aparecimento da RCF, quando o Universo tinha cerca de 300000 anos. As flutuações que existiam naquela época aparecem nas medidas de anisotropia da RCF como pequenos “picos” de intensidade no céu.

Nosso aprendizado ao estudar a RCF é bastante grande. Descobrimos, nos últimos 30 anos, que o Universo, muito provavelmente, passou por uma época em que era extremamente denso e quente – encontrava-se em equilíbrio térmico, consistindo em um “plasma primordial” de radiação e matéria. Hoje sabemos também que, desde sua criação, ele vem se expandindo e resfriando. Aprendemos, ainda, que a temperatura média do Universo (que é igual à temperatura da RCF) é de cerca de 2,726 graus K, ou cerca de -270 graus Celsius, distribuída de maneira quase uniforme em todo o céu. Entretanto, era um fato conhecido dos cientistas que, se essa distribuição fosse completamente uniforme, seria muito difícil explicar como o Universo passou da “sopa primordial” para esse estado extremamente complexo que vemos no céu.

Em 1992, o satélite COBE, lançado pela NASA com o propósito de estudar as características da RCF (Figura 5.20) detectou, de maneira conclusiva, que a distribuição de temperatura da RCF pelo céu não é totalmente uniforme; ao contrário, ela possui pequenas flutuações, chamadas de anisotropias (Figura 5.21). Logo após o resultado do COBE, diversos experimentos vêm confirmando a existência de flutuações na RCF em diferentes escalas. A interpretação da distribuição desses picos em função da escala pode trazer algumas respostas sobre o tipo de matéria que constitui o Universo, qual é a sua idade e se a quantidade de matéria que existe no Universo é capaz de frear a expansão que hoje observamos.

5.5.3 A NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL E A QUÍMICA DO UNIVERSO

Embora a análise espectral da luz emitida por estrelas e galáxias seja dominada por elementos mais pesados que o hidrogênio e o hélio, aqueles são muito mais raros do que os dois mais leves. Comparativamente, menos de 2% da massa da Galáxia é composta de elementos mais pesados que o hélio. Pode-se aproximar essa abundância dizendo que, se pesarmos toda a massa disponível no Universo, cerca de 75% é hidrogênio, 24% é hélio e 1% corresponde a todo o resto dos elementos presentes na natureza. Os físicos e cosmólogos acreditam que a razão da composição química do Universo ser assim é porque hidrogênio e hélio foram criados nos primeiros instantes do Universo.

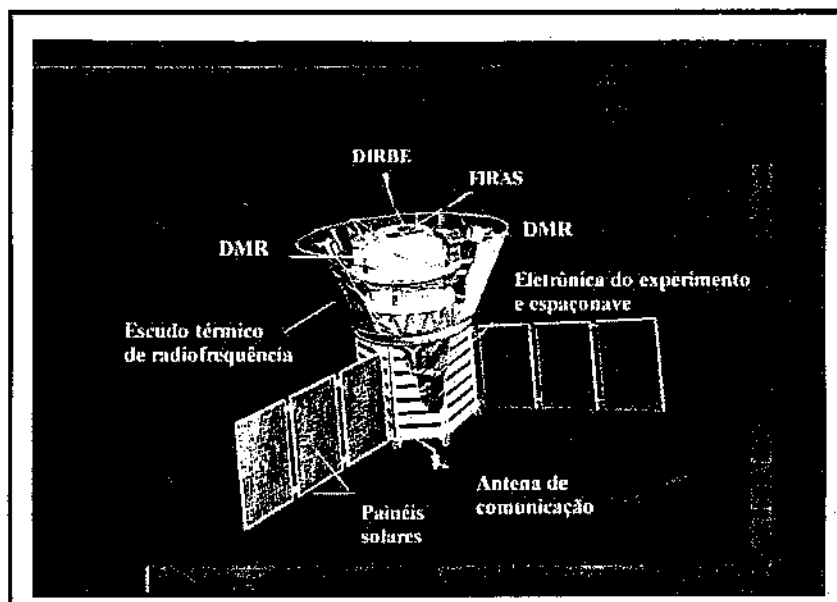


FIGURA 5.20 - DESENHO DO SATÉLITE COBE (COSMIC BACKGROUND EXPLORER), PROJETADO PELA NASA PARA ESTUDAR A RCF. ELE OPEROU DE NOVEMBRO DE 1989 A FEVEREIRO DE 1994 E GEROU O MELHOR CONJUNTO DE DADOS COSMOLÓGICOS DISPONÍVEIS HOJE.

A primeira análise nas condições extremas do BIG BANG foi feita por George Gamow, que descobriu que a composição do Universo jovem não deveria conter elementos diferentes dos quatro mencionados na Seção 5.4.2. Já foi visto no capítulo 4 que praticamente todos os elementos mais pesados que o hélio são formados no interior das estrelas, durante as reações nucleares que as fazem brilhar.

O trabalho teórico sobre a nucleossíntese explicou completamente a origem dos elementos “pesados” e somente restou uma explicação cosmológica para a abundância observada do hidrogênio e do hélio. O trabalho de Gamow abriu esse caminho, em fins da década de 40 e o modelo do BIG BANG fornece a proporção exata observada dos dois elementos. Como mencionado na Seção 5.4.2, o momento da formação ocorreu entre 0,01 e 100 segundos depois do BIG BANG, quando a temperatura era da ordem de 1 bilhão de graus Kelvin.

As observações da abundância de hélio no Universo atual permitem, indiretamente, a determinação das condições físicas cerca de dois a três minutos após a criação do Universo. Em termos de observações, diretas ou indiretas, não podemos ir mais longe. Daí para trás, somente podemos deduzir algo sobre o Universo através de cálculos, simulações e especulações teóricas.

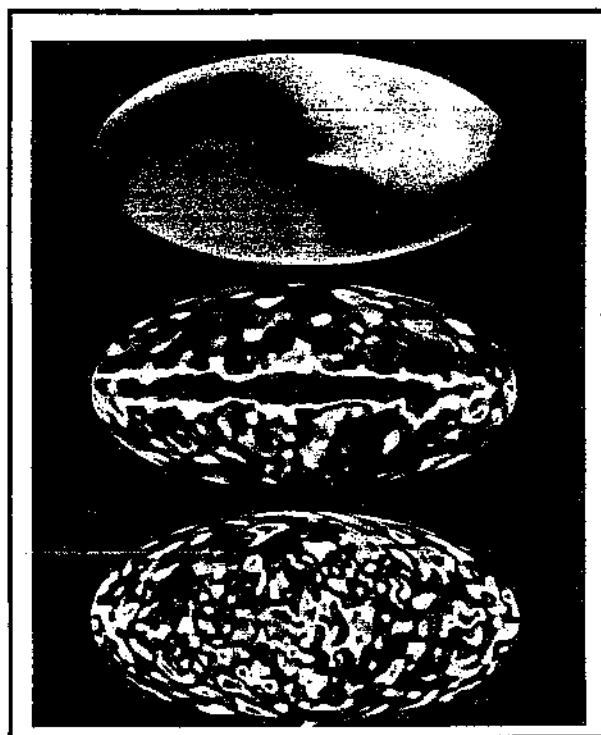


FIGURA 5.21 - MAPAS DAS FLUTUAÇÕES DE TEMPERATURA PRODUZIDOS PELO SATÉLITE COBE. DE CIMA PARA BAIXO TEMOS UM MAPA BRUTO, COM A CONTRIBUIÇÃO DO NOSSO MOVIMENTO EM RELAÇÃO A RCF (UM DIPOLO), MAPA SEM DIPOLO, MAS COM A CONTRIBUIÇÃO DA GALÁXIA PRESENTE E, EM BAIXO, MAPA COM OS PRINCIPAIS ELEMENTOS DE CONTAMINAÇÃO REMOVIDOS. AS MANCHAS AZUIS (FRIAS) E ROSAS (QUENTES) CORRESPONDEM ÀS FLUTUAÇÕES DE TEMPERATURA NO UNIVERSO JOVEM.

5.6 O FUTURO DO UNIVERSO

A questão do futuro do Universo está ligada, diretamente, à quantidade de matéria que o Universo possui. A combinação da matéria comum (formada de prótons, nêutrons e elétrons) e matéria escura (que não sabemos exatamente do que é feita) determina não só se o Universo continuará nesse processo de expansão mas também a geometria (se ele é um Universo aberto, fechado ou plano).

A identificação da matéria escura será capaz de nos contar se a expansão das galáxias é constante, se está aumentando ou diminuindo. Como a força predominante nessas condições de enormes distâncias é a força da gravidade, devemos imaginar que a expansão vai sendo freada devido à atração mútua entre os componentes do Universo (galáxias, aglomerados e superaglomerados). Essa força depende da densidade média de matéria no Universo. Se a densidade for maior que a densidade crítica, ρ_c , a expansão será interrompida e o movimento se inverterá, conduzindo o Universo a um colapso, ou "BIG CRUNCH". Para valores menores que ρ_c a expansão acontecerá eternamente. O valor de ρ_c é facilmente calculado. Ele depende da inclinação da reta na Figura 5.15 e do valor da constante de gravitacional G . A melhor estimativa é que $\rho_c = 10^{-29} \text{ g.cm}^{-3}$. Uma situação simples e atraente, em termos de simetria, seria descobrirmos que a densidade do Universo é exatamente igual a ρ_c . Nesse caso, a expansão iria diminuindo até que, num futuro muito distante, ela iria parar, mas jamais inverter o sentido e colapsar novamente.

Conforme discutimos anteriormente, toda a matéria que forma a nossa galáxia, outras galáxias e aglomerados pode ser estimada por meios dinâmicos, isto é, aplicando-se as leis de Newton e as leis de conservação de energia. Essa relação entre a energia cinética (que quantifica o movimento das galáxias) e a energia gravitacional (que "atrapalha" o movimento, tendendo a puxar as galáxias umas ao encontro das outras) é chamada de teorema do Virial. Por estudos dos resultados da aplicação do teorema do Virial, chegamos à conclusão que a quantidade de matéria escura no Universo é, pelo menos, 10 vezes maior do que a quantidade de matéria normal.

Vimos que existem candidatos à matéria escura, que ela certamente é um resíduo do Universo jovem e que está espalhada pelo Universo, sendo, provavelmente, a responsável pelo início do processo de formação das estruturas observadas. Mas supondo que ela não seja suficiente para que o Universo seja "fechado" – implicando então que ele vai se expandir eternamente – ou, melhor ainda, seja exatamente suficiente para que o Universo tenha a densidade crítica (densidade igual a ρ_c), o que poderemos esperar?

Ao longo dessa monografia podemos ressaltar um fato notável: todo esse processo de criação e evolução do Cosmos, o que governa a sua dinâmica, o que mantém esse delicado equilíbrio entre a enormidade de corpos celestes, é um "*cabo de guerra*" entre a força da gravidade e diversas outras forças que, em diferentes épocas da vida de uma estrela, de um sistema planetário, de um aglomerado de galáxias, atuam contrabalançando a tendência da gravidade de atrair os corpos. Então, se imaginarmos que o Universo não tem matéria suficiente para interromper completamente o processo de expansão, o que vai acontecer com o passar do tempo?

Bom, estrelas se formam de nuvens de hidrogênio... daqui a muitos bilhões de anos, teremos a seguinte situação: todo o hidrogênio disponível para virar estrela terá sido consumido nas reações nucleares e os átomos que não foram consumidos então não terão mais como se agrupar para formar estrelas, porque a expansão terá separado as nuvens que são, naturalmente, o local onde acontece formação de estrelas. E as galáxias? Nas galáxias de campo, que se encontram sozinhas, as estrelas mais velhas já terão queimado todo o seu combustível e a galáxia apagará, porque não haverá mais formação estelar. As galáxias que se encontram em grupos e aglomerados, provavelmente entrarão em estado de equilíbrio gravitacional ou então se fundirão em um só objeto. O que acontece com as estrelas das galáxias de campo também acontecerá, mais cedo ou mais tarde, com as galáxias em grupos.

Juntando a isso as conseqüências da Segunda Lei da Termodinâmica, que diz que, sempre que acontece um evento irreversível no Universo, a entropia (que pode ser comparada ao grau de desorganização de um determinado sistema) permanece constante ou aumenta, caminhamos então para um estado em que não haverá mais energia disponível no Universo para que aconteçam eventos quaisquer. Todos os corpos estarão no seu estado de energia mínima – onde não há como perturbá-los sem que mais energia seja introduzida – e entropia máxima. Os físicos dizem então que o Universo está em seus momentos finais. Se não houver nenhum processo inesperado que modifique esse quadro (e que nem podemos imaginar direito qual seja), estaremos presenciando a morte térmica do Universo. Essa é uma das conseqüências naturais de um modelo de Universo

que começa com um BIG BANG e cuja quantidade de matéria não é suficiente para interromper o processo de expansão.

Por outro lado, caso a densidade seja maior do que ρ_c , e supondo que vivemos num Universo que começou com uma grande explosão, teremos um instante (não sabemos exatamente quando) em que a expansão do Universo será interrompida e ele começará a se contrair. A gravidade puxará então os corpos novamente uns de encontro aos outros e, seguindo as leis da Termodinâmica, a temperatura do Universo novamente aumentará. Com a diminuição do volume e aumento gradual da densidade, teremos uma contração acelerada e o final desse processo será um "BIG CRUNCH", com o Universo voltando a uma singularidade e levando consigo todo o espaço-tempo.

Se as idéias levantadas acima acontecerão exatamente desse modo ou mesmo qual delas representa o destino do Universo ainda não sabemos responder. As questões formuladas pelos cientistas que trabalham com a física de partículas se juntam às dos cosmólogos nessa tentativa de definir qual será o futuro do Universo que hoje observamos. Para terminar de montar o quadro, as respostas procuradas pela Cosmologia são cruciais, pois o valor da taxa de expansão do Universo, sua idade e a quantidade de matéria que descrevem sua geometria e dinâmica são peças chave no quebra-cabeças que é desvendar o Universo.

5.7 CONCLUSÃO

A Cosmologia é uma ciência que trabalha para tentar entender o conteúdo, estrutura e evolução do Universo ao longo de sua vida e ao longo de enormes distâncias. Ela tenta também entender como o Universo se comportou sob condições extremas de densidade, temperatura e energia.

Teóricos, observadores e experimentalistas estão desenvolvendo uma grande variedade de técnicas e instrumentos para responder as questões fundamentais que levantamos ao longo desse capítulo. O progresso ao longo dos últimos 30 anos foi enorme, mas na década de 90, em particular, a Cosmologia tornou-se o que chamamos de ciência

madura, dispondo de uma enorme quantidade de dados, informações diversas e teoria e instrumentação avançando rapidamente.

Observações recentes do satélite COBE e outros experimentos responderam algumas das indagações sobre a estrutura e a história térmica do Universo. Observações das estruturas em grande escala (estimada a partir da distribuição de galáxias) vêm sendo feitas por diversos grupos no mundo, usando dados de telescópios no solo e a bordo de satélites (Telescópio Hubble). Nosso conhecimento sobre a distribuição e movimento peculiar (causado pela distribuição de massa no Universo) das galáxias ainda é incompleto, mas, no próximos anos, é provável que não só esse movimento seja bastante bem entendido como também seremos capazes de entender exatamente qual é o papel da matéria escura no Universo. Uma nova geração de experimentos (telescópios gigantes, satélites e experimentos cuja tecnologia teve que ser desenvolvida especialmente para eles) estão fazendo ou planejam fazer novas medidas e estudar o Universo de formas inimagináveis há 20 anos atrás. Estimativas da idade do Universo e da quantidade de matéria escura estão em andamento, com o Telescópio Espacial Hubble, e em projeto com os telescópios GEMINI (nos quais o Brasil tem uma participação ativa).

Esperamos um enorme avanço no entendimento da evolução das galáxias e das estruturas em grande escala na próxima década. Ainda não sabemos exatamente qual é a natureza da matéria escura, mas provavelmente ela é um “resíduo” do Universo jovem. Vários experimentos estão em andamento para detectar ou eliminar candidatos e cremos que haverá uma resposta, pelo mais precisa do que hoje, em alguns anos.

Os problemas principais que a Cosmologia tenta resolver são bem formulados, mas muitas das soluções tem permanecido obscuras por décadas. Finalmente, com o aumento da quantidade de informações obtidas a partir do avanço dos experimentos, computadores e o conseqüente avanço da teoria, uma boa parte das questões fundamentais apresentadas nesse capítulo estão começando a ser resolvidas. Nós, da DAS, que participamos dessa corrida ao conhecimento, estamos trabalhando com os olhos voltados para os resultados que, quase certamente, surgirão nos próximos

anos e as novas idéias que eles trarão. Se uma monografia sobre esse mesmo tema for escrita dentro de 10 ou 20 anos, temos certeza que ela em pouco se parecerá com esta, no que diz respeito aos problemas fundamentais que a Cosmologia pretende resolver.

5.8 SUGESTÕES DE LEITURA

Além da bibliografia em português e inglês consultada, incluo alguns outros textos que talvez despertem a atenção daqueles que tiveram uma formação em ciências exatas. Eles foram escolhidos com base pura e simplesmente no meu gosto pessoal, estando ordenadas por ordem crescente de dificuldade.

- Ferris (1990): Texto de divulgação, um pouco romanceado, mas que cobre de forma bastante fiel a história da astronomia, desde seus primórdios. O autor é um dos grandes jornalistas ligados à divulgação científica nos EUA.
- Hawking (1988): Um dos livros mais divulgados sobre Cosmologia, lamentavelmente muito mal traduzido para o português, sob o título “Uma breve história do tempo”. Ainda assim, um texto muito interessante, por mostrar a visão de Universo de um dos grandes físicos da segunda metade do século XX.
- Riordan e Schramm (1991): Texto de divulgação científica, escrito com o objetivo de passar ao leitor os conceitos básicos do processo de formação de estruturas e da existência de matéria escura no Universo.
- Wuensche (1994): Ensaio sobre o problema da formação de estruturas no Universo, escrito para a revista da UnB, basicamente voltada para um público de ciências humanas.

- Silk (1989): Escrito por um dos físicos de maior destaque na área, esse livro apresenta o modelo do Big Bang de forma simples, e introduz alguns conceitos matemáticos (também concentrados em um apêndice) um pouco mais complexos que os apresentados no livro de Weinberg.
- Weinberg (1980): Escrito por um físico de partículas que se aventurou no terreno da Cosmologia, esse texto apresenta, numa linguagem clara e simples, um resumo do Universo primordial. Um dos primeiros textos de divulgação escrito sobre Cosmologia (1977), possui um apêndice matemático para aqueles que desejarem se aventurar...
- **Cosmology: a research briefing** (1995): Um texto escrito pelo comitê assessor de uma das agências financiadoras da pesquisa básica nos EUA, sugerindo as diretrizes a serem seguidas no próximo século e os principais problemas a serem atacados em astrofísica e cosmologia. Escrito para não especialistas, é uma excelente introdução aos problemas atuais.
- Shu (1982): Livro-texto adotado em diversas universidades americanas, em geral usado para apresentar um curso de um ano em astronomia para alunos que não vão seguir a carreira científica.

5.9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ferris, T. **O despertar da Via Láctea**. Rio de Janeiro: Campus, 1990.

Hawking, S. **A brief history of time**. New York: Bantam Books, 1988.

Riordan, M.; Schramm, D. **Shadows of creation: dark matter and the structure of the universe**. New York: W. H. Freeman 1991.

Wuensche, C. A. A radiação cósmica de fundo e a formação de estrutura em larga escala no Universo: uma visão atual. *Revista Humanidades*, v.10, n. 2, p.142-151, 1994.

Silk, J. **O Big Bang**. 2.ed. Brasília: UnB, 1989.

Weinberg, S. **Os três primeiros minutos**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980.

Cosmology: a research briefing. [online] <<http://bob.nap.edu/readingroom/books/cosmology>> March 31, 1999.

Shu, F. **The physical universe**. Sansalito: University Science Books, 1982.

Capítulo 6

PESQUISAS EM ASTROFÍSICA NO INPE

Thyrso Villela Neto^{*}

^{*}e-mail: villela@das.inpe.br

PESQUISAS EM ASTROFÍSICA NO INPE

6.1	INTRODUÇÃO.....	6-5
6.2	AS PESQUISAS EM ASTROFÍSICA NO INPE.....	6-9
6.2.1	MEIO INTERPLANETÁRIO E FÍSICA SOLAR	6-9
6.2.2	ESTRELAS	6-9
6.2.3	PULSARES E BURACOS NEGROS	6-11
6.2.4	GALÁXIAS	6-11
6.2.5	RAIOS CÓSMICOS	6-12
6.2.6	COSMOLOGIA.....	6-12
6.3	INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA.....	6-13
6.3.1	INSTRUMENTOS NO SOLO	6-13
6.3.2	INSTRUMENTOS NO ESPAÇO	6-16
6.4	CONCLUSÃO	6-19

6.1 INTRODUÇÃO

A Astrofísica é a atividade do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE - que poderia representar de forma mais direta o nome do Instituto. Afinal, seu objeto de estudo é o espaço e sua atuação abrange as mais distantes fronteiras que podem ser vislumbradas pelo ser humano, tanto em tempo quanto em espaço. Historicamente, a origem da pesquisa em Astrofísica no INPE está ligada ao desenvolvimento da Ciência Espacial no Instituto. A Ciência Espacial foi a área da qual se originou todo o INPE. Inicialmente, o objetivo era estudar o espaço circunvizinho à Terra. Mais tarde, esse campo de estudo foi ampliado passando a abranger o espaço exterior. Para tanto, houve a necessidade de desenvolver instrumentos que fizessem observações no espaço, a bordo de balões, foguetes e satélites, já que a atmosfera terrestre absorve grande parte dos sinais que vêm do espaço.

As pesquisas nessa área, no INPE, começaram na década de sessenta e vêm se desenvolvendo desde então, com alguns ajustes sendo feitos nesse período. As primeiras pesquisas relacionavam-se com a Astrofísica de Altas Energias, que tem como objetivo de estudo entender as emissões de raios-X e gama oriundas de objetos cósmicos, como pulsares, estrelas binárias, buracos negros, galáxias etc. Mais tarde, houve o desenvolvimento de estudos na área de Radioastronomia, com a incorporação pelo INPE do Radiotelescópio do Itapetinga, em Atibaia. Em meados da década de 80, iniciaram-se os estudos relacionados com as observações na faixa óptica do espectro eletromagnético, com a vinda de um grupo de pesquisadores que atuam nessa área.

O objetivo da Astrofísica é o estudo dos objetos e estruturas que formam o Universo em que vivemos. Estamos acostumados a ouvir falar do meio ambiente que nos cerca e a Astrofísica nada mais faz do que estudar o meio ambiente em que a Terra está inserida. Portanto, assim como é importante conhecer os rios, as montanhas, os vales e o clima que nos cercam, conhecer as estrelas, planetas, galáxias e cometas também é muito importante. Realizar pesquisas em Astrofísica significa conhecer o nosso meio ambiente. É conveniente lembrar que o meio ambiente, na verdade, é a totalidade dos

fatores externos suscetíveis de influírem sobre a vida biológica, social ou cultural de um indivíduo ou grupo; o espaço externo à Terra é um dos fatores que influenciam diretamente a vida na Terra. Portanto, devemos conhecê-lo da melhor forma possível.

O Sol é o componente da natureza que mais diretamente afeta a vida na Terra. É ele quem define o regime de temperatura no nosso planeta. O Sol também é o responsável pelos ciclos de vida das diversas espécies da Terra, definindo, por exemplo, a fotossíntese. Pode ter, também, efeitos indesejáveis, como a interferência nas telecomunicações e na incidência de câncer de pele no ser humano. Dessa forma, é mais do que evidente que devemos entender muito bem como o Sol se comporta para que possamos nos precaver de possíveis problemas. Outros exemplos também podem ser dados sobre como o estudo da Astrofísica pode contribuir para a melhoria da qualidade de vida do Homem. Antes de mais nada, a Astrofísica pode contribuir para a preservação da vida na Terra como um todo, seja por meio de previsão de catástrofes, como choques de cometas ou asteróides de grandes proporções com a Terra, seja por meio de estudos que possibilitem a colonização de outros planetas ou mesmo de estrelas por seres humanos no futuro. O nosso planeta corre o risco de ser bombardeado por algum corpo que esteja vagando pelo espaço, como aconteceu recentemente com Júpiter, e sofrer graves consequências, entre elas a extinção da espécie humana. Supõe-se que no passado algo semelhante tenha ocorrido na aqui na Terra e tenha provocado o desaparecimento de várias espécies, entre elas a dos dinossauros. As pesquisas astronômicas podem ajudar na previsão de catástrofes como essas e permitir que medidas sejam tomadas com antecedência para evitá-las ou minimizá-las. Uma outra contribuição, e das mais importantes, da Astrofísica foi o de desmistificar crendices que, infelizmente, persistem até os dias de hoje, como a astrologia.

As pesquisas em Astronomia e Astrofísica realizadas pelo INPE estão concentradas na Divisão de Astrofísica (DAS), que é uma das três divisões científicas da Coordenação Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA) do INPE. O objetivo dessas pesquisas é entender os fenômenos que ocorrem no Universo de um modo geral. Busca-se conhecer as causas desses fenômenos e entender a Física que governa os objetos que são vistos no céu, como estrelas, galáxias, quasares, buracos negros, entre outros.

A DAS conta com 16 pesquisadores que se dedicam a alguns dos temas de domínio da Astrofísica, que englobam estudos que se utilizam de observações no espectro eletromagnético (da Radioastronomia à Astrofísica de Raios Gama), em partículas, como a detecção de raios cósmicos (prótons, elétrons e íons) e ondas gravitacionais. Desses 16 pesquisadores, 15 são doutores e um é mestre, mas está cursando o doutorado. A DAS conta ainda com 2 engenheiros eletrônicos, 1 especialista em óptica e 3 técnicos ligados diretamente ao trabalho de desenvolvimento de experimentos para a pesquisa em Astrofísica. A DAS conta com laboratórios equipados para propiciar o desenvolvimento de instrumentação científica nas áreas de microondas, rádio, óptica, raios-X, raios gama, raios cósmicos e ondas gravitacionais.

Os estudos em Astrofísica podem trazer benefícios diretos à sociedade e fornecer dados para que problemas de outras áreas possam vir a ser resolvidos. Hoje em dia, por exemplo, a Física de Partículas, que procura entender como a matéria é formada, precisa construir aceleradores de partículas de altíssimas energias. Infelizmente, isso não é tão simples assim, já que envolve sérios problemas tecnológicos e financeiros. No entanto, o Universo está repleto de regiões onde há energia suficiente para acelerar partículas a velocidades altíssimas. Pela observação dessas regiões e dos fenômenos que lá ocorrem, pode-se aprender muito sobre as coisas que acontecem aqui na Terra.

De uma forma geral, pode-se até questionar o porquê de se investir tempo e dinheiro em pesquisas relacionadas à Astrofísica num país como o Brasil. Afinal, o Brasil não é um país onde os recursos financeiros sejam abundantes e ainda há muito o que deve ser feito no campo social. No entanto, deve-se ter em mente que um país deve tentar dominar o maior número possível de temas ligados ao conhecimento humano, já que o bem-estar de seu povo está intimamente ligado ao grau de conhecimento que o país possui. Atualmente, o conhecimento é a arma mais poderosa para o desenvolvimento econômico. Apenas como exemplos, podem ser citados os casos de alguns produtos que foram desenvolvidos ou aperfeiçoados graças aos investimentos feitos em pesquisas em Astrofísica e que hoje rendem dividendos para os detentores dessas tecnologias: a câmara de vídeo com base no CCD (charge coupled device), que são utilizadas nas transmissões de TV e nas videocâmaras portáteis de uso doméstico, os aparelhos de

tomografia computadorizada utilizados em medicina, os sistemas de inspeção de bagagens em aeroportos com "scanners" de raios-X, vários sistemas de microondas utilizados em telefonia celular, etc. Além desses exemplos, pode ser citado ainda o enorme potencial que a Astrofísica tem de tentar responder um dos maiores anseios do ser humano, que é entender o Universo em que vive e saber mais sobre esse meio ambiente que o cerca.

Como vimos, o estudo da Astrofísica não se resume apenas à poesia que o tema suscita, mas induz e permite a solução de vários problemas cruciais para a sociedade.

Tradicionalmente, a DAS tenta desenvolver pesquisas que necessitam de observações com instrumentos que não estão disponíveis no País, de forma a estimular o desenvolvimento de instrumentação científica no Brasil. Isso deve-se ao fato de o INPE proporcionar uma ótima infraestrutura para esse tipo de atividade, que muitas vezes não se encontra disponível nas universidades e outros centros de pesquisa. Em particular, as atividades ligadas ao desenvolvimento de instrumentação espacial, com experimentos a bordo de balões, foguetes e satélites, têm o seu lugar natural no INPE, que é o maior órgão civil na área espacial no Brasil.

Atrelada à sua atuação técnico-científica, o INPE mantém um curso de pós-graduação em Astrofísica que confere títulos de mestre e doutor. Os temas das dissertações e teses são ligados às pesquisas desenvolvidas pela Divisão.

A Divisão de Astrofísica possui uma rede de estações de trabalho e de microcomputadores nos quais se acham instalados os principais *softwares* usados pela comunidade astronômica internacional para a redução e análise de dados e preparação de trabalhos na área. Esses computadores são utilizados pelos pesquisadores e estudantes (de mestrado e doutorado) para pesquisa e atividades acadêmicas. O INPE possui um centro de computação, uma biblioteca especializada, com mais de 70.000 volumes e 1.500 assinaturas de revistas científicas, e mantém um Setor de Lançamento de Balões à disposição da comunidade científica nacional e estrangeira para a realização de experiências que envolvam a necessidade de utilização de balões estratosféricos.

6.2 AS PESQUISAS EM ASTROFÍSICA NO INPE

A pesquisa na DAS está dividida, formalmente, em 5 linhas de pesquisa, embora haja uma interação entre os pesquisadores que permeia essa divisão. Quatro dessas linhas de pesquisa são compostas exclusivamente por pesquisadores da DAS, enquanto uma é composta por membros DAS e das outras duas divisões da CEA (Geofísica Espacial e Aeronômica). As cinco linhas de pesquisa estão assim distribuídas: Astrofísica de Altas Energias, com 3 pesquisadores, Astrofísica Óptica, com 5 pesquisadores, Cosmologia e Gravitação, com 3 pesquisadores, Radioastrofísica Molecular, com 3 pesquisadores, Física do Meio Interplanetário, com 2 pesquisadores. Todas essas linhas contam com a participação de diversos estudantes de pós-graduação (mestrado e doutorado) e iniciação científica. As pesquisas podem ser melhor definidas, em termos dos objetivos científicos, por meio dos seguintes temas:

6.2.1 MEIO INTERPLANETÁRIO E FÍSICA SOLAR

Em Física do Meio Interplanetário e Solar são estudados os mecanismos físicos referentes às questões fundamentais de fulgurações (explosões) solares, à propagação dos efeitos desses fenômenos pelo meio interplanetário e sua influência na magnetosfera terrestre. Em particular, no Sol são investigados os processos de armazenamento de energia para as fulgurações, o mecanismo causador da liberação desta energia e que dá início ao fenômeno, e os meios para prever a ocorrência dessas fulgurações. Essas investigações são feitas por meio de observações em várias regiões do espectro eletromagnético, utilizando sistemas receptores em rádio nas bandas decimétrica e milimétrica, em conjunto com outros observatórios internacionais, e com dados em raios-X obtidos com experimentos a bordo de satélites. Desenvolve-se instrumentação na bandas rádio decimétrica e milimétrica.

6.2.2 ESTRELAS

As estrelas são estudadas de várias formas pelos pesquisadores da DAS. São feitas observações em vários comprimentos de onda, de rádio a raios gama, passando

pelo óptico. É estudada a origem das variações de brilho em objetos astrofísicos que apresentam discos de matéria ao seu redor, como as estrelas variáveis cataclísmicas, binárias de raios-X e estrelas pré-seqüência principal. Nessas pesquisas utiliza-se, na faixa óptica do espectro, um fotômetro CCD desenvolvido em colaboração com o Laboratório Nacional de Astrofísica. Desenvolve-se instrumentação para a realização de medidas fotométricas e espectroscópicas no infravermelho próximo com o objetivo de estudar as colunas de acreção de matéria de objetos altamente magnetizados e de estrelas secundárias de variáveis cataclísmicas e binárias X.

Também é tema de pesquisa, teórica e observacional, o estudo das camadas envoltórias de estrelas quentes, com ênfase em sua geometria e variabilidade temporal. Os estudos observacionais abrangem medidas fotométricas, espectroscópicas e polarimétricas no visível e no infravermelho. Atualmente desenvolve-se instrumentação para a realização de medidas fotométricas e espectroscópicas no infravermelho próximo, com fibras ópticas, e para polarimetria (linear e circular), com imageadores CCD.

Na faixa de rádio a linha de pesquisa que trata da radioastrofísica molecular investiga as emissões em ondas milimétricas provenientes de transições moleculares observadas na direção de nebulosas da Via-láctea e de outras galáxias. Buscam-se regiões de formação de estrelas visando entender como acontecem essas emissões. São também estudadas estrelas em seus últimos estágios evolutivos, que podem apresentar intensa emissão molecular. As principais transições moleculares estudadas são as de H_2O e SiO , por meio de sua emissão *maser*, e as de NH_3 , CS e CH_3OH , por meio de sua emissão térmica. Todas essas emissões estão situadas entre 21 e 24 GHz e 40 e 50 GHz. É desenvolvida instrumentação nas áreas de espectroscopia acústico-óptica e de receptores criogênicos. Essas pesquisas são efetuadas no Radio Observatório do Itapetinga e em cooperação com outros observatórios internacionais. São também feitos trabalhos relacionados ao estudo da emissão rádio proveniente nuvens circunstelares e nuvens interestelares Galácticas.

6.2.3 PULSARES E BURACOS NEGROS

São realizados estudos sobre os mecanismos pelos quais algumas classes de objetos astrofísicos, tais como estrelas binárias de raios-X, pulsares, núcleos ativos de galáxias e buracos negros, constituem-se em fontes de emissão de radiação eletromagnética de alta energia (raios-X e gama). Essas fontes estão em geral associadas a objetos que sofreram colapso no final de suas vidas, tais como estrelas anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros. São temas correntes da pesquisa em altas energias no INPE o estudo de pulsares de raios-X e de estrelas variáveis cataclísmicas. As técnicas experimentais utilizadas envolvem observações dessas fontes por meio de detectores de radiação X e gama que são colocados a bordo de balões estratosféricos. O desenvolvimento de novos detectores, bem como de técnicas de detecção e de imageamento no domínio de raios-X e gama, são esforços permanentes do INPE. São feitas também observações nos telescópios ópticos de forma a complementar as informações obtidas em raios-X e gama.

Pulsares e buracos negros são objetos cósmicos altamente intrigantes dadas as suas características singulares. Entender a Física responsável pela formação desses objetos pode ter desdobramentos enormes para outros ramos da ciência. Muito ainda precisa ser feito para que se possa entender em detalhes os mecanismos físicos responsáveis pela emissão eletromagnética de pulsares e buracos negros e a DAS tem contribuído bastante nesse sentido com a identificação de vários parâmetros que identificam esses objetos.

6.2.4 GALÁXIAS

Estudam-se as condições físicas reinantes nas galáxias e nas grandes estruturas por elas formadas, os aglomerados, sua origem e evolução em escalas de tempo cosmológicas. São realizados estudos, teóricos e observacionais sobre a dinâmica e a evolução química de galáxias normais assim como de galáxias apresentam atividade peculiar (quasares e núcleos ativos de galáxias). Simulações numéricas de encontros e colapsos de galáxias constituem tema de pesquisa nesta área. Também são realizadas pesquisas sobre a dinâmica e evolução dos grupos e aglomerados de galáxias. A fotometria e a

espectroscopia no visível, em telescópios brasileiros ou no exterior, constituem a principal fonte de dados nestes estudos. É desenvolvida instrumentação óptica eficiente e competitiva que é utilizada nos telescópios brasileiros.

6.2.5 RAIOS CÓSMICOS

Na pesquisa relacionada aos raios cósmicos, o objetivo é estudar as diferentes partículas que atingem a Terra vindas do espaço exterior, como prótons, elétrons e íons. Em particular, estudam-se as partículas aprisionadas nos cinturões de radiação que envolvem a Terra. Essas partículas são aprisionadas ao redor da Terra devido à influência do campo magnético terrestre. Elas são provenientes de várias regiões e fontes do Universo, desde as mais próximas, como o Sol, até as mais longínquas, como os meios interestelar e intergaláctico. Conhecendo as características dessas partículas, como energia e densidade numérica, pode-se conseguir várias informações sobre as regiões de onde elas foram geradas.

6.2.6 COSMOLOGIA

Em Cosmologia, a ênfase é dada ao estudo da Radiação Cósmica de Fundo de 3 K (--- 270° C), em microondas, originária do *Big Bang*, a grande explosão da qual o Universo se originou, principalmente nos aspectos relacionados à sua distribuição espacial, que fornecem informações a respeito do processo de formação das estruturas que observamos no céu, como galáxias e aglomerados de galáxias. São realizadas observações com detectores de microondas e infravermelho embarcados em balões estratosféricos e satélites. Está sendo desenvolvido atualmente um experimento, em conjunto com instituições no exterior, capaz de obter dados que complementem os obtidos pelo satélite COBE. Esse instrumento fará vôos a bordo de balões estratosféricos por mais de 100 dias ao redor da Terra. São feitas também observações da emissão rádio da nossa galáxia com o objetivo de conhecer o grau de contaminação desse sinal nas medidas da Radiação de Fundo.

6.3 INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

Para que a pesquisa em Astrofísica seja realizada, é necessário obter informações sobre o Universo de diferentes formas. Em geral, são utilizados instrumentos baseados no solo, como os telescópios ópticos e os radiotelescópios, e no espaço, como os experimentos embarcados em balões, foguetes e satélites. Os pesquisadores da DAS utilizam-se de praticamente todos os meios disponíveis hoje em dia para obter os dados necessários para as pesquisas astrofísicas realizadas pela DAS.

6.3.1 INSTRUMENTOS NO SOLO

6.3.1.1 TELESCÓPIOS ÓPTICOS:

Os pesquisadores da DAS utilizam em suas pesquisas dados obtidos na região óptica e infravermelha do espectro eletromagnético com os telescópios situados no Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Esses telescópios estão instalados no sul de Minas Gerais, a 1864 m de altitude, no Observatório do Pico dos Dias (OPD/LNA), município de Brasópolis. Os telescópios utilizados são os seguintes:

- Telescópio de 1,6 m de diâmetro (Perkin-Elmer):

Este é o principal telescópio do OPD/LNA. Entrou em funcionamento em 1981. O espelho primário tem 1,6 m de diâmetro. Esse telescópio realiza apontamento e acompanhamento de alvos no céu sob controle de um programa desenvolvido pela UFMG e LNA. A precisão absoluta do apontamento é de 15 segundos de arco. O telescópio é utilizado para fotometria e espectroscopia.

- Telescópio 0,6 m de diâmetro (Boller & Chivens):

Este telescópio foi instalado no OPD em 1992 por meio de um convênio entre o

Instituto Astronômico e Geofísico da USP e o LNA. O espelho primário tem 60 cm de diâmetro. O apontamento desse telescópio utiliza uma adaptação do programa desenvolvido para o telescópio de 1,6 m. É utilizado exclusivamente para fotometria.

- Telescópio 0,6 m de diâmetro (Zeiss):

Este telescópio foi adquirido da ex-Alemanha Oriental em troca de café nos anos 60/70. Permaneceu armazenado em Brasópolis durante muitos anos até ser montado em 1983 no OPD. O projeto óptico é de um Cassegrain clássico, com primário parabólico e secundário hiperbólico. O instrumento tem apontamento manual. É utilizado exclusivamente para fotometria.

São utilizados vários detectores acoplados a esses telescópios como uma câmara de infravermelho, imageadores CCD, fotômetros e espectrômetros. A câmara infravermelha (CamIV), que foi construída por integrantes da DAS e está em operação desde março de 1999, é baseada em um detector de alta resolução e é refrigerada a uma temperatura de 77 K (-196° C) de forma a melhorar sua sensibilidade. Opera na faixa de 0,8 a 2,4 μm . Está sendo utilizada no LNA e permite a realização de projetos espectroscópicos com alta resolução. Pode operar com diferentes resoluções angulares, dependendo do arranjo óptico feito no telescópio no qual será instalada. É apropriada para realizar observações tanto de pequenas quanto grandes áreas do céu.

6.3.1.2 RADIOTELESCÓPIOS

- ROI

O Rádio Observatório do Itapetinga (ROI), situado numa área de 3 alqueires dentro do município de Atibaia, SP, é o local onde se encontra a maior instalação destinada à radioastronomia no Brasil. Em funcionamento desde o início da década de setenta, é operado hoje pelo INPE e está a disposição de toda a comunidade científica nacional. Possui uma antena de 13,7 m de diâmetro capaz de receber sinais de frequência entre 1 e 150 GHz. São realizadas várias pesquisas astronômicas, incluindo as

relacionadas a Física Solar, formação de estrelas, astronomia galáctica e extragaláctica.

- Antena decimétrica solar de 9 m de diâmetro:

Esta antena encontra-se instalada no INPE, em São José dos Campos, e é dedicada ao estudo da física solar e do meio interplanetário. Encontram-se instalados um espectrógrafo decimétrico de banda larga (200-2500 MHz), de alta sensibilidade e resolução, que fornece dados aos pesquisadores sobre os fenômenos que acontecem no Sol e no espaço entre os planetas. Encontra-se também em operação um receptor de frequência variável (18-23 GHz), um espectrômetro decimétrico de banda estreita de altas resoluções temporal e espectral e um espectrômetro digital decimétrico de alta resolução e banda larga. Encontra-se em fase de desenvolvimento um espectrômetro milimétrico de frequência variável. Esta antena está em operação há alguns anos.

- GEM

O radiotelescópio GEM (do inglês *Galactic Emission Mapping* – Mapeamento da Emissão Galáctica) é fruto um projeto desenvolvido dentro de uma colaboração internacional envolvendo pesquisadores da DAS e instituições dos Estados Unidos da América, Itália e Colômbia. Trata-se de uma antena de 5,5 m de diâmetro capaz de operar com receptores rádio entre 400 MHz e 10 GHz. O objetivo é fazer um levantamento em forma de mapas de todo o céu em algumas frequências de rádio. É um instrumento dedicado a essa pesquisa e que opera 24 horas por dia durante todos os dias do ano obtendo dados. Naturalmente, são realizadas manutenções periódicas no instrumento e também realizadas viagens para instalá-lo em diversas localidades ao redor do globo terrestre. Esse instrumento já realizou observações nos Estados Unidos, na Colômbia, nas Ilhas Canárias, Espanha, no Pólo Sul, e está agora no Brasil, instalada no campus do INPE em Cachoeira Paulista, SP, onde deve operar por alguns anos.

6.3.1.3 OBSERVATÓRIO DE ONDAS GRAVITACIONAIS

O Projeto Gráviton é um esforço de cientistas brasileiros de diversas instituições (INPE, USP, UnB, CBPF/LAFEX) para construir uma antena gravitacional ressonante capaz de observar sinais gravitacionais oriundos de fontes astrofísicas. A primeira detecção de ondas gravitacionais terá um impacto extraordinário na pesquisa em Física, não só porque confirmará uma previsão fundamental da Teoria da Relatividade Geral e testará várias teorias de gravitação, mas também porque representará a abertura de uma nova "janela" para estudar o Universo, permitindo observar fenômenos que seriam impossíveis de ser observados no espectro eletromagnético.

A Antena Einstein consistirá em um poliedro maciço, com 3 metros de diâmetro, feito de uma liga metálica pesando várias toneladas. O telessensor será capaz de converter a energia das ondas gravitacionais em impulsos elétricos que serão amplificados por dispositivos supercondutores, digitalizados e, então, processados e analisados computacionalmente. Para minimizar ruídos externos o detector terá que ser mantido sob alto vácuo e refrigerado a temperaturas ultra baixas, de ordem de 0,1 kelvin (ou $\sim -273^{\circ}\text{C}$). A sensibilidade com que essa antena operará vai permitir detectar uma explosão de supernova ou o choque de duas estrelas compactas, que originalmente orbitassem entre si, se estes eventos ocorrerem até uma distância de 15 Mpc (50 milhões de anos luz). Isto inclui o Aglomerado de Virgem, que possui milhares de galáxias, e aumenta as chances de observação do fenômeno.

6.3.2 INSTRUMENTOS NO ESPAÇO

6.3.2.1 BALÕES

- **MASCO**

O projeto MASCO tem como objetivo construir um telescópio que seja capaz de realizar observações do céu, produzindo imagens, em raios-X e gama de várias regiões do Universo. Essas emissões cósmicas só podem ser observadas em grandes altitudes por causa da absorção da atmosfera terrestre. Para realizar essas observações, o

telescópio será colocado a bordo de uma plataforma que será suspensa por um balão plástico cheio de hidrogênio. As observações serão realizadas a aproximadamente 42 km de altitude. O diâmetro do balão quando estiver totalmente inflado será superior a 100 m, o que equivale ao comprimento de um campo de futebol. Muitas vezes esses balões voam a mais de 120 km/h, o que exige que os sistemas de controle sejam altamente eficientes para manter o telescópio apontando para um alvo no céu independentemente do movimento do balão. A técnica utilizada para obter as imagens em raios-X e gama é conhecida como “máscara codificada”, daí o nome do projeto, que se originou das duas primeiras sílabas das palavras que formam o nome da técnica de imageamento empregada.

- ACE

O projeto ACE (*Advanced Cosmic Explorer*), uma cooperação científica entre a DAS, a Universidade da Califórnia, Santa Bárbara (EUA), o Jet Propulsion Lab (EUA) e o National Center for Atmospheric Research (EUA), é um experimento concebido para estudar a distribuição angular da Radiação Cósmica de Fundo em microondas em escalas angulares entre $0,15^\circ$ e 10° . Ele será capaz de gerar um conjunto de mapas do céu na faixa de comprimentos de onda milimétricos (entre 25 e 100 GHz) com uma resolução melhor que 1° .

O ACE é um projeto a ser lançado em balão estratosférico em vôos de longa duração ($t > 100$ dias). Ele será montado sobre uma plataforma estabilizada, sendo o conjunto gôndola-sistema óptico construído utilizando-se materiais compostos, o que tornará toda a estrutura extremamente leve. Versões antigas utilizaram espelhos comuns, do mesmo tipo empregado para medidas em microondas. Entretanto, no caso do ACE, o peso a ser carregado pelo balão estratosférico é um fator crítico. O projeto consistirá em quatro vôos de diferentes latitudes (sendo um do Brasil), cobrindo cerca de 75% do céu com a melhor combinação de resolução angular e sensibilidade já conseguida.

6.3.2.2 SATÉLITES

- *SAC-B*

O *Satélite de Aplicaciones Científicas* (SAC-B) foi um experimento de colaboração entre instituições científicas da Argentina, da Itália, dos EUA e o INPE, com a finalidade de estudar a emissão de raios-X do Sol. Foi o primeiro satélite construído pela Argentina e foi totalmente testado no INPE, tendo a participação de pesquisadores da DAS. Infelizmente, devido a uma falha do foguete Pegasus dos EUA, o satélite foi perdido depois do lançamento, no final de 1996. De qualquer forma, os testes realizados pelo INPE mostraram que há domínio tecnológico no Brasil para testar com sucesso experimentos científicos espaciais.

- *SACI-1*

O primeiro microssatélite brasileiro, SACI-1 (Satélite Científico) levará a bordo vários pequenos experimentos, dentre eles um experimento que conta com a participação de pesquisadores da DAS. Trata-se do experimento ORCAS (Observações de Raios Cósmicos Anômalos e Solares na Magnetosfera) que tem a missão de monitorar a concentração e o fluxo de partículas como elétrons, Hélio, Neônio e Lítio na magnetosfera terrestre. O experimento ORCAS é dotado de dois telescópios, um secundário, denominado PRE, e um principal, denominado MAIN, capazes de observar o fluxo e o espectro dessas partículas, além da variação temporal de ambos durante as diferentes atividades solares. O experimento ORCAS foi o resultado de uma colaboração científica entre o INPE e instituições de pesquisa dos EUA e Japão.

- *Satélite Franco-Brasileiro*

Encontra-se em fase de desenvolvimento um satélite científico de pequeno porte denominado FIRE (Flare InfraRed Experiment), que tem como objetivo científico realizar observações do Sol no infravermelho. Esse satélite está sendo desenvolvido em conjunto com pesquisadores do Centro de Radioastronomia e Aplicações Espaciais (CRAAE), que é um consórcio que engloba pesquisadores do INPE, da Universidade

Estadual de Campinas e Universidade Mackenzie, e instituições estrangeiras.

6.4 CONCLUSÃO

Os pesquisadores da DAS têm contribuído bastante para o avanço da Astrofísica em termos mundiais. Várias descobertas foram feitas graças às pesquisas realizadas no INPE. Essas contribuições incluem todas as áreas de pesquisa citadas acima. Por exemplo, em rádio e microondas foram descobertas estruturas peculiares presentes na emissão rádio do Sol, foi obtido um mapa da emissão da nossa galáxia que mostra características novas, foram realizadas observações da distribuição angular da Radiação Cósmica de Fundo em microondas revelando novas características que são fundamentais para a Cosmologia, e foram desenvolvidos vários sistemas que possibilitarão a obtenção de dados de melhor qualidade. Em óptica, foi descoberto um novo quasar, PDS456, que é 1,3 vezes mais luminoso que o quasar 3C273, que é o quasar mais conhecido, e tornou-se o quasar mais luminoso no Universo próximo. Também foram descobertas características novas na emissão de pulsares. Em altas energias, contribuições significativas foram realizadas no campo do estudo de galáxias e aglomerados.

Em termos de avanços na área de instrumentação, vários sistemas foram desenvolvidos em todas os campos de atuação dos pesquisadores do INPE: conquistou-se o domínio da produção de componentes para receptores de rádio e microondas, foram realizados projetos ópticos de precisão, desenvolvidas técnicas de imageamento em óptica, raios-X e gama, projetados e construídos sistemas automáticos de controle de plataformas espaciais, com o desenvolvimento de um sensor estelar, houve o desenvolvimento de instrumentos a serem usados em satélites, etc. As pesquisas em instrumentação astronômica realizadas pelo INPE são responsáveis pela quase totalidade da produção nacional na área.

As pesquisas desenvolvidas pelos pesquisadores da DAS são publicadas nos melhores periódicos técnicos e científicos do mundo, que são sujeitos aos mais rigorosos sistemas de avaliação da qualidade, da importância e da originalidade dos trabalhos. Esses trabalhos também são apresentados nas principais reuniões técnico-científicas realizadas no Brasil e no mundo.

As pesquisas realizadas pela DAS contribuem também para a formação de pessoal altamente qualificado que será incorporado aos vários segmentos produtivos brasileiros, seja da área técnico-científica ou de áreas correlatas, o que garante um retorno altamente importante para a sociedade.

**PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS
EDITADAS PELO INPE**

RELATÓRIOS DE PESQUISA

- Reportam resultados de pesquisa tanto de natureza técnica quanto científica.

NOTAS TÉCNICO-CIENTÍFICAS

- Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, software, sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados e atlas, e documentação de projetos de engenharia.

MANUAIS TÉCNICOS

- Descrevem normas, procedimentos, instruções e orientações.

PUBLICAÇÕES DIDÁTICAS

- Apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

TESES E DISSERTAÇÕES

- Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

PUBLICAÇÕES SERIADAS

- Periódicos Técnico-científicos: Boletim de Sensoriamento Remoto, Climanálise; Boletim de Monitoramento e Análise Climática.
- Anais de Eventos

1. 1. 1.

1. 1. 1.

1. 1. 1.