Imprimir Fechar

Metadados

Tipo da Referência	Edited Book
Identificador	8JMKD3MGP3W34R/3SLENSP
Repositório	sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/01.30.11.14
Metadados	sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/01.30.11.14.47
Site	mtc-m21c.sid.inpe.br
Chave Secundária	INPE-7177-PUD/38
Código do Detentor	{isadg {BR SPINPE} ibi 8JMKD3MGPCW/3DT298S}
Chave de Citação	MiloneWRDJCBCVAM::InAsAs
Editor	1 Milone, André de Castro 2 Wuensche, Carlos Alexandre 3 Rodrigues, Cláudia Vilega 4 D'Amico, Flavio 5 Jablonski, Francisco José 6 Capelato, Hugo Vicente 7 Braga, João 8 Cecatto, José Roberto 9 Vilas Boas, José Williams dos Santos 10 Aguiar, Odylio Denys de 11 Miranda, Oswaldo Duarte
Título	**Introdução à astronomia e astrofísica V II**
Volume	**II**
Número de Volumes	**II**
Editora (Publisher)	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Cidade	São José dos Campos
Palavras-Chave	**astronomia, astrofísica.**

Resumo

A fascinação pelos mistérios do Universo faz parte da natureza humana desde o começo da civilização. Ao mesmo tempo 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 transformação? Estamos em São José dos Campos, uma cidade do planeta Terra, onde os astrônomos do INPE, iguais a muitos em outros lugares, estão investigando os segredos do Universo. Fazem isso pela satisfação que o conhecimento produz. Mais profundamente, o fazem para ampliar os horizontes do 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 ideias e tecnologias. Alguns subprodutos esperados são 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.

Número de Páginas	434
Idioma	pt
Tipo Secundário	PUD
Area	CEA
Tamanho	232 KiB
Número de Arquivos	1
Arquivo Alvo	publicacao.pdf
Última Atualização	2019:01.31.18.54.55 urlib.net/www/2017/11.22.19.04 simone
Última Atualização dos Metadados	2019:02.01.12.38.28 urlib.net/www/2017/11.22.19.04 simone {D {}}
Estágio do Documento	em andamento
É a matriz ou uma cópia?	é a matriz
Espelho	urlib.net/www/2017/11.22.19.04.03
Endereço de e-Mail	luis.cpv@hotmail.com
Grupo de Usuários	luis.cpv@hotmail.com pubtc@inpe.br simone
Grupo de Leitores	administrator pubtc@inpe.br simone
Visibilidade	shown
Transferível	1
Acervo Hospedeiro	urlib.net/www/2017/11.22.19.04
Estágio do Documento	not transferred
Repositório de Direitos Autorais	urlib.net/www/2012/11.12.14.05
Permissão de Leitura	allow from all
Conteúdo da Pasta source	não têm arquivos
Conteúdo da Pasta agreement	.htaccess 31/01/2019 16:54 27 B .htaccess2 31/01/2019 16:54 27 B autorizacao.pdf 31/01/2019 16:54 1.0 MiB

Histórico 2019-01-30 11:14:47 :: luis.cpv@hotmail.com -> pubtc@inpe.br ::
2019-02-01 12:20:05 :: pubtc@inpe.br -> simone ::
2019-02-01 12:38:28 :: simone -> ::

Campos Vazios affiliation archivingpolicy archivist booktitle callnumber contenttype copyholder creatorhistory descriptionlevel dissemination doi edition electronicmailaddress format group isbn issn label lineage mark nextedition nexthigherunit notes orcid organization parameterlist parentrepositories previousedition previouslowerunit progress project resumeid rightsholder secondarydate secondarymark serieseditor seriestitle session shorttitle sponsor subject tertiarymark tertiarytype url versiontype year

Data de Acesso 01 fev. 2019

Fechar

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

TERMO PARA O DEPÓSITO LEGAL E AUTORIZAÇÃO PARA A PUBLICAÇÃO DE OBRA LITERÁRIA

Eu, abaixo assinado,
André de Castro Milone,
(Nome Completo)
Residente e domiciliado em:
Rua Armando de Oliveira Cobra 99, apto 102, Aquarius, S. J. dos Campos, SP, Cep 12246-002

(Endereço Completo)
portador do documento de identidade (RG (⊙) - RNE (○) – Passaporte (○))

n°: 06565702-5 / SSP-RJ,
(Número do Documento / Órgão Emissor)

com Cadastro Pessoa Física (CPF) n°: 895.615.467-87,
(Número CPF)
na qualidade de titular (Autor (⊙) – Sucessor (○), Parentesco: _____,

do autor: _____), ou representante (○)

do titular: _____, dos direitos morais e patrimoniais de autor que recaem sobre minha obra intitulada:

INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA E ASTROFÍSICA VII

(título da obra)
de autoria de :

André de Castro Milone, Carlos Alexandre Wuensche, Cláudia Vilega Rodrigues, Flávio D'Amico, Francisco José Jablonski, Hugo Vicente Capelato, João Braga, José Roberto Cecatto, José Williams Vilas Boas, Odylio Denys de Aguiar e Oswaldo Duarte Miranda
(Nomes completo do(s) autor(es))
possuindo o Identificador com Base na Internet (IBI): _____,
(Repositório ou IBIp)
com fundamento nas disposições da Lei n°9.610 de 19 de fevereiro de 1998, garanto que a obra não infringe quaisquer direitos autorais.

Na oportunidade, cedo uma cópia digital da obra para o INPE e, caso disponível, todos os arquivos fonte gerador. Autorizo o INPE a colocá-la ao alcance do público na Web, a partir de 28 / janeiro / 2019 (dia/mês/ano), acompanhada de uma das seguintes licenças:

(○) Domínio Público CCO [1]
(⊙) Creative commons CC BY - Atribuição [2]
(○) CC BY-SA - Atribuição e Compartilhamento pela mesma Licença [2]
(○) CC BY-ND - Atribuição e Não a Obras Derivadas [2]
(○) CC BY-NC - Atribuição e Uso Não Comercial [2]

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

(O) CC BY-NC-SA - Atribuição, Uso Não Comercial e Compartilhamento pela mesma Licença [2]
(O) CC BY-NC-ND - Atribuição, Uso Não Comecial e Não a Obras Derivadas [2]
(O) Software – GPLv2 (GENERAL PUBLIC LICENSE versão 2) [3]
(O) Software – GPLv3 (GENERAL PUBLIC LICENSE versão 3) [3]
(O) Software – LGPL (LIBRARY ou LESSER GENERAL PUBLIC LICENSE) [4]
(O) Software – BSD (SOFTWARE DISTRIBUTION) [5]
(O) Software – MPL 2.0 (MOZILLA PUBLIC LICENSE versão 2.0) [6]
(O) Software – MIT LICENSE (Massachusetts Institute of Technology) [7]

Informo que permissões adicionais de uso da minha obra podem ser obtidas por meio da URL ou endereço de e-mail:

http://www.inpe.br/ciaa2018/arquivos/pdfs/apostila_ciaa_completa_2018.pdf (opcional).

Estou ciente que o INPE não se responsabiliza pela defesa da obra e proteção do direito de autor, por exemplo, em caso de plágio.

Autorizo também o INPE a fazer as alterações de formato que forem necessárias para torná-la e mantê-la uma publicação do INPE acessível na Web.

Estou ciente que, conforme a Lei n°12.527, de 18 de novembro de 2011 e Resoluções INPE RE/DIR-202 e 204, o INPE será, em particular, responsável pelo armazenamento, preservação, e franqueamento de consulta da obra, além de zelar pela manutenção da identificação, acesso e integridade de qualquer cópia sob sua responsabilidade.

Por motivo de segurança, guardo em meu poder, uma cópia da obra.

Finalmente, declaro que assino em nome dos cotitulares, caso exista algum, os quais estão cientes dos termos desta autorização.

Local/data: São José dos Campos, 28 de janeiro de 2019

Assinatura do Titular da Obra ou seu Representante

[1] http://creativecommons.org/about/cc0
[2] http://creativecommons.org/licenses
[3] http://opensource.org/licenses/gpl-license.php
[4] http://www.gnu.org/copyleft/lesser.html
[5] http://www.freebsd.org/copyright/freebsd-license.html
[6] http://www.mozilla.org/MPL/2.0
[7] http://www.opensource.org/licenses/mit-license.php

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/01.30.11.14-PUD

INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA E ASTROFÍSICA V II

André de Castro Milone
Carlos Alexandre Wuensche
Cláudia Vilega Rodrigues
Flávio D'Amico
Francisco José Jablonski
Hugo Vicente Capelato
João Braga
José Roberto Cecatto
José Williams Vilas Boas
Odylio Denys de Aguiar
Oswaldo Duarte Miranda

INPE-7177-PUD/38

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3SLENSP>

INPE
São José dos Campos
2019

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GBDIR)
Serviço de Informação e Documentação (SESID)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Murilo Luiz Silva Gino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/01.30.11.14-PUD

INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA E ASTROFÍSICA V II

André de Castro Milone
Carlos Alexandre Wuensche
Cláudia Vilega Rodrigues
Flávio D'Amico
Francisco José Jablonski
Hugo Vicente Capelato
João Braga
José Roberto Cecatto
José Williams Vilas Boas
Odylio Denys de Aguiar
Oswaldo Duarte Miranda

INPE-7177-PUD/38

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3SLENSP>

INPE
São José dos Campos
2019

Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Divisão de Astrofísica
Av. dos Astronautas, 1758
12227-010 – São José dos Campos, SP
Tel.: (12) 3208-7200

Colaboração na redação: Ana Maria Zodi

AGRADECIMENTOS:

Space Telescope Science Institute (STScI); National Space Science Data Center (NSSDC): como fontes de boa parte das figuras e tabelas utilizadas.

Setores de Comunicação Visual e Desenho do INPE: pela edição de algumas figuras.

APRESENTAÇÃO

A fascinação pelos mistérios do Universo faz parte da natureza humana desde o começo da civilização. Ao mesmo tempo 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 transformação?

Estamos em São José dos Campos, uma cidade do planeta Terra, onde os astrônomos do INPE, iguais a muitos em outros lugares, estão investigando os segredos do Universo. Fazem isso pela satisfação que o conhecimento produz. Mais profundamente, o fazem para ampliar os horizontes do 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 subprodutos esperados são 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

Pág.

CAPÍTULO 1
A ASTRONOMIA NO DIA A DIA (*André de Castro Milone*) 1-1

CAPÍTULO 2
ASTROFÍSICA OBSERVACIONAL (*Francisco José Jablonski*) 2-1

CAPÍTULO 3
O SISTEMA SOLAR (*Cláudia Vilega Rodrigues*) 3-1

CAPÍTULO 4
O SOL (*José Roberto Cecatto*) 4-1

CAPÍTULO 5
FORMAÇÃO DE ESTRELAS (*José Williams Vilas Boas*) 5-1

CAPÍTULO 6
A VIDA DAS ESTRELAS (*Hugo Vicente Capelato*) 6-1

CAPÍTULO 7
ESTÁGIOS FINAIS DE ESTRELAS (*Flávio D'Amico*) 7-1

CAPÍTULO 8
GALÁXIAS (*Carlos Alexandre Wuensche*) 8-1

CAPÍTULO 9
COSMOLOGIA (*Carlos Alexandre Wuensche*) 9-1

CAPÍTULO 10
ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS (*Odylio Denys de Aguiar*) 10-1

CAPÍTULO 11
HABITABILIDADE CÓSMICA E A POSSIBILIDADE DE EXISTÊNCIA DE VIDA EM OUTROS LOCAIS DO UNIVERSO (*Carlos Alexandre Wuensche*) 11-1

CAPÍTULO 12
PESQUISAS EM ASTROFÍSICA NO INPE (*Oswaldo Duarte Miranda – Rev. João Braga*) 12-1

Capítulo 1

ASTRONOMIA NO DIA A DIA

André de Castro Milone*

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

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. REPARE 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 comestíveis, 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, especialmente 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, Indu 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 deslocamento 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 deslocamento do Sol no céu durante 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?

Constelação é uma região da esfera celeste onde existe uma certa configuração projetada de estrelas. Os antigos astrônomos costumavam associar figuras de objetos, heróis ou deuses a tais configurações de estrelas. Muitas sociedades herdaram as constelações de outras enquanto que algumas conceberam suas próprias constelações como aquelas do grupo indígena tupi-guarani. 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 estórias 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 deslocamento 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 deslocamento 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 Pompilo (717-673 a.C.) possuía 355 dias divididos basicamente em 12 ou 13 meses (de 29 ou 31 dias). O calendário de Pompilo 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, 2000 foi bissexto, 2100 não 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 3.333,3333... 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.

$$\mathbf{365{,}2422 \text{ dias} \cong 365 + 1/4 - 1/100 + 1/400 - 1/3.300 \text{ dias}}$$

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 3.300 anos, aproximadamente.

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

ORIGEM DA SEMANA

O vocábulo semana provém do latim *septmana*, 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 *feriaes* 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 3° milênio começaram em 2001, e não em 2000, como muita gente pôde 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 *Helius*, 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 o seu deslocamento 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 por apenas 3 minutos e 56 segundos em média.

1 Dia Solar = 24 horas (solares)

1 dia sideral ≅ 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 ≡ 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 d'água 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 *stadias* (unidade de comprimento da época; 1 *stadia* ≅ 185 m), a estimativa de Eratóstenes para o diâmetro polar da Terra foi de 14.722 km, próximo do valor real de 12.718 km.

d(AS) = 5.000 *stadias* = 925 km ---> 7°,2

$2\pi R$ ---> 360°

$2R \times \pi \times 7{,}2 = 925 \times 360$ km

$2R = 14.722$ km

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.

É fácil compreender a idéia de imobilidade da Terra, seja ela esférica ou não. Do ponto 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 (leia a seção A EVOLUÇÃO DO CONHECIMENTO SOBRE O SISTEMA SOLAR do capítulo O SISTEMA SOLAR, 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). Os círculos que unem os pólos ao longo de sua superfície (hipoteticamente esférica) e são concêntricos a Terra são os Meridianos Terrestres. Um plano perpendicular ao eixo de rotação, e eqüidistante 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 1.670 km/h. Sobre o Trópico de Capricórnio (latitude aproximada de São José dos Campos), a velocidade de rotação é cerca de 1.500 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 (Fig. 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° (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 (°) ou em horas (h), indo de 0° no Meridiano de Greenwich até +180° (ou +12 h) quando contamos para leste a partir de Greenwich, e até -180° (ou –12 h) quando contamos para oeste (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° para norte e 0° a -90° para sul. A ascensão reta é contada sobre o Equador Celeste desde o Ponto Gama ou Vernal até o meridiano do astro no sentido de oeste para leste (o mesmo da rotação da Terra), variando de 0 a 24 h. O Ponto Gama é uma das interseções da Eclíptica (trajetória anual do Sol no céu) com o Equador Celeste, marcando a passagem do Sol do hemisfério celeste sul para norte (início da Primavera Boreal).

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 se desloca 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 (em torno de 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° 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.

No caso intermediário (Figura 1.6), se estivermos fora do Equador ou de um dos pólos terrestres (como é o caso de São José dos Campos), perceberemos que as trajetórias aparentes diárias dos astros ocorrem em planos oblíquos ao plano do Horizonte. O plano do Equador Celeste apresentar-se-á também com a mesma obliqüidade relativa ao Horizonte. O pólo celeste, correspondente ao hemisfério onde a pessoa se situa, fica elevado no céu, e o outro, abaixo do Horizonte. Os astros ficam uma parte do dia visíveis acima do plano do Horizonte e a outra parte abaixo do mesmo, em períodos desiguais. Certos astros próximos do pólo celeste elevado ficam sempre acima do Horizonte (aparentemente girando em torno desse pólo) e uma parte do céu próxima ao outro pólo celeste nunca é visível.

FIGURA 1.6 - VISÃO TOPOCÊNTRICA DA ESFERA CELESTE A PARTIR DE UM LOCAL ENTRE O EQUADOR E O 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 "porem") 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 a 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 a 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, deslocando-se 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).

Seqüencialmente, 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 Cardeal Leste, deslocando-se ao longo do dia sobre o Equador do céu e escondendo-se, exatamente também, no Ponto Cardeal Oeste (isso ocorre para quase toda a Terra; as exceções são os pólos geográficos). Os Solstícios são os dias quando o Sol mais se distancia dos Pontos Cardeais Leste e Oeste, no nascer e ocaso, respectivamente. No Solstício do Verão Austral, o Sol surge 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 a 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 (≅ 23°,5). O ângulo entre a direção do Sol e a do Ponto Cardeal 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°,5 (precisamente 23° 26' 21'' no ano 2000.0). 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 com um período de cerca de 25.800 anos. 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 produziria uma modificação lenta e gradual nas datas dos Solstícios e Equinócios, antecipando-as, caso a correção correspondente não fosse aplicada ao Sistema de Coordenadas Celestes Equatoriais. 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 num certo dia do mês 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 deslocando-se 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.

A velocidade da translação terrestre foi obtida por medida direta astronômica em 1729 com os trabalhos do físico inglês James Bradley, o qual visava medir distâncias de estrelas. Bradley observou algo inesperado: a direção das estrelas sofria um desvio sistemático e cíclico. A razão é dada pela combinação da velocidade orbital da Terra com a da luz (≈300.000 km/s), nomeada 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 conseqüências 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 em cerca de 20 min devido à precessão retrógrada do eixo de rotação da Terra que faz o Ponto Gama se deslocar no Equador Celeste no sentido de encontro ao Sol (quando este perfaz o seu movimento aparente anual de oeste para leste ao longo da Eclíptica). 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 min/ano x 72 anos = 24 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 ascenção 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. A(s) estrela(s) mais brilhante(s) destas constelações, facilmente observada(s) a olho nu, é(são) apresentada(s) entre parênteses para algumas delas.

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. Quatro estados da Região Norte não estão representados nesse modelo oficial da bandeira.

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 (Rigil Kent e Hadar) e Libra.	Virgem.	Boieiro (Arcturus) e Leão.
Inverno	Capricórnio, Sagitário, Ofiúco e Escorpião (Antares).	As zodiacais da estação e Centauro (Rigil 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 Hélio 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, é um astro que produz e emite radiação eletromagnética em vários comprimentos de onda (ler os Capítulos 2 a 5); ou seja, as estrelas 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 solar (o qual consequentemente definirá a duração do Dia Solar da Lua). Uma lunação dura 29 dias, 12 h, 44 min e 3 s (solares), cerca de 29 dias e meio, maior que o período sideral! É a base dos calendários lunares. Veja também a seção ANO SOLAR E LUNAÇÃO.

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 conseqüência 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 eqüidistante 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 sideral de rotação é igual ao seu período sideral de translação, isto é, o dia sideral da Lua dura cerca de 27 Dias Solares da Terra.

A face oculta não corresponde a 50% da superfície da Lua. Do ponto de vista terrestre, pode-se avistar mais que a metade devido a uma oscilação aparente da Lua denominada de libração, a qual corresponde simplesmente a uma questão de perspectiva ou paralaxe.

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 pôs 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 freqüentemente 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. REPARE 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°,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 (TS) de 7.300.000 km, por volta de 19 vezes a distância média Terra-Lua (TL), ou seja, muito menor que o valor real (TS ≈ 389 TL).

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, 1,25 mm de diâmetro. A distância Terra-Lua (≅ 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 é a região da sombra que não recebe nenhuma luz solar direta e a penumbra a região que recebe luz solar de modo parcial. No entanto, para a Terra, que possui uma camada de ar ao seu redor, os limites do seu cone umbral e de sua penumbra não são bem definidos. A luz do Sol é refratada e espalhada quando atravessa a atmosfera terrestre, fazendo com que o cone umbral da Terra não seja totalmente escuro, e sim iluminado indiretamente por mais luz vermelha do que azul. O mesmo não ocorre com a sombra da 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 (leia o 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 a 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; o eclipse é observado como parcial da região 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 a 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 de 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°,2 (veja a 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 mas 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 (≈ 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 conseqüência, 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.m^2/kg^2 no sistema MKS de unidades).

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

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. Astronometria. 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. Estrutura do 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 ptlomaico: apostila do 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**. Rio de Janeiro: Fundação Planetário da Cidade do Rio de Janeiro, SMC/PCRJ, 1996.

Capítulo 2

ASTROFÍSICA OBSERVACIONAL

Francisco José Jablonski

f.jablonski@gmail.com

Sumário

2 Astrofísica Observacional **9**

2.1 O Espectro Eletromagnético 9

2.1.1 O que quer dizer espectro eletromagnético 9

2.1.2 Espectro sonoro (ou acústico) 10

2.1.3 O espectro eletromagnético (EM) 12

2.1.4 Espectro de ondas gravitacionais 21

2.2 Efeitos de diluição de ondas e radiação 23

2.2.1 O meio ambiente e o espectro acústico 23

2.2.2 A atmosfera da terra e o espectro eletromagnético . . . 25

2.3 Detectores e telescópios 28

2.3.1 Detectores de ondas sonoras 28

2.3.2 Detectores e telescópios para ondas eletromagnéticas . 28

Lista de Figuras

2.1 O "espectro" do rei Hamlet. 9

2.2 O espectro acústico de um piano na 4ª oitava. 11

2.3 As ondas acústicas correspondentes ao espectro sonoro da figura 2.2 11

2.4 O espectro de ondas acústicas no Sol e em Alfa do Centauro (https://www2.hao.ucar.edu/hao-science/sun-dynamo-0) . . . 12

2.5 O espectro da emissão das rádios na região de FM. Fonte: autor 13

2.6 O espectro eletromagnético. Note as unidades, 1 nm = 0,000000001 metros, ou $10^{-9}\,m$. Fonte: https://commons.wikimedia.org 15

2.7 O primeiro exoplaneta imageado diretamente, na estrela 2M1207, com o exoplaneta 2M1207b (mais vermelho) próximo. Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/2M1207 17

2.8 O espectro eletromagnético aproximado de estrelas a diferentes temperaturas. Obtido em: http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/B/Blackbody+Radiation

2.9 O espectro real de alguns tipos de estrelas. A temperatura diminui de baixo para cima, mais ou menos seguindo a cor dominante das estrelas. Compare com a figura 2.8. http://www.jb.man.ac.uk/distance/life/sampl

2.10 Um sistema binário com a representação do deslocamento Doppler da linha espectral de um mesmo elemento à medida que as estrelas se movem em órbita. Fonte: http://astro.if.ufrgs.br/bin/binarias.htm. 21

2.11 A primeira detecção de ondas gravitacionais. Os gráficos em vermelho e azul referem-se aos dois observatórios separados de 4000 quilômetros. Os painéis de baixo mostram como a frequência das oscilações foi mudando com o tempo. Fonte: Wikipedia. 22

2.12 A diluição da energia da onda (por unidade de comprimento) com a distância à fonte. 24

2.13 A diluição da energia (por unidade de área) com a distância à fonte. De: http://projetosfisicaexperimental.blogspot.com.br/2016/03/lei-do-inverso-do-quadrado-da-distancia.html 24

2.14 O caminho mais longo produz atenuação da luz ao atravessar a atmosfera terrestre. Fonte: autor 26

2.15 As janelas de observação a partir do solo. Obtido em: http://www.lna.br/ museuvirtual/evolucao.html 27

2.16 Uma das 50 antenas do radiotelescópio BINGO, em construção na DAS/INPE. Fonte: L. Reitano. 30

2.17 Exemplo de uma câmara pinhole, ilustrando a determinação da intensidade e direção da radiação eletromagnética. 31

2.18 Passo a passo de como construir uma câmara pinhole. Obtida em https://www.jornalufgonline.ufg.br/n/30640-camera-pinhole 32

2.19 O telescópio ProtoMirax para raios X, com o padrão de aberturas na parte superior. Fonte: autor. 33

2.20 Esquema de um telescópio simples. Fonte: autor. 33
2.21 O telescópio de 1,6-m de diâmetro do Laboratório Nacional de Astrofísica, no Pico dos Dias, Sul de Minas Gerais. Fonte: autor. 34
2.22 Visão artística de como será o GMT, com abertura de 26-m de diâmetro. Fonte: https://www.gmto.org/ 35

2.1 O Espectro Eletromagnético

2.1.1 O que quer dizer espectro eletromagnético

Hamlet é o nome da peça muito famosa escrita por William Shakespeare. A cena inicial é impressionante: Os guardas de um castelo na Dinamarca vêm o espectro do Rei 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, adultério, a caveira de um alegre bobo da corte desenterrada no momento oportuno e, claro, um *espectro* fantasmagórico. No cinema, uma das montagens mais famosas tem Mel Gibson no papel de Hamlet. A cena inicial mostra o espectro do velho Rei sob a 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 sessões você verá o que os dois conceitos têm em comum e, principalmente, no quê

são distintos.

2.1.2 Espectro sonoro (ou acústico)

Quem resiste apertar pelo menos uma tecla estando perto de um piano? Se apertarmos a vigésima nona tecla da esquerda para a direita (tecla lá, 4ª oitava), o som produzido é uma vibração de 440 ciclos por segundo[1]. Tecnicamente, dizemos que a frequência da onda sonora correspondente ao $lá_4$ é 440 Hertz ou 440 Hz. As outras teclas nesta mesma oitava dão sons de $dó_4$ 262 Hz, $ré_4$ 294 Hz, mi_4 330 Hz, $fá_4$ 349 Hz, sol_4 392 Hz, si_4 494 Hz. 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 $dó_5$ tem 524 Hz de frequência.

A figura 2.2 mostra o espectro acústico do piano em torno da 4ª 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 $lá_4$.

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 a nota lá executa $440/100 = 4{,}4$ oscilações.

Exercício: Tente imaginar como seria o espectro sonoro de uma apresentação ao vivo da sua banda favorita de rock.

[1]Note que existe uma convenção em que esta nota está na terceira oitava, mas isto é irrelevante aqui.

Figura 2.2: O espectro acústico de um piano na 4ª oitava.

Figura 2.3: As ondas acústicas correspondentes ao espectro sonoro da figura 2.2

A figura 2.4 mostra um outro exemplo de espectro acústico: tanto o nosso Sol quanto a vizinha Alfa do Centauro oscilam num conjunto de frequências entre $4 - 6$ minutos, como se fossem enormes sinos vibrando continuamente.

O estudo das frequências de vibração das estrelas chama-se *Astrosismologia* e permite conhecer detalhes muito finos da estrutura interna delas.

Figura 2.4: O espectro de ondas acústicas no Sol e em Alfa do Centauro (https://www2.hao.ucar.edu/hao-science/sun-dynamo-0)

2.1.3 O espectro eletromagnético (EM)

Agora fica mais fácil visualizar o que é espectro eletromagnético (EM). É um conceito semelhante ao mostrado nas figuras 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 uma rádio transmite em AM na frequência de 780 quilo-hertz, 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.

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 mega-hertz ou 88 MHz) e 108 MHz temos a frequências onde operam as emissoras de FM. A figura 2.5 ilustra o espectro das rádios FM. Note que algumas são

Figura 2.5: O espectro da emissão das rádios na região de FM. Fonte: autor

mais fortes que outras. Telefones celulares operam em frequências de quase 1 bilhão de Hertz (1 giga-hertz ou 1 GHz).

Neste ponto, é interessante lembrar de duas equações que são muito usadas em física, engenharia e astronomia:

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

$$comprimento\ de\ onda\ (metros) = \frac{velocidade\ da\ luz\ (m/s)}{frequência\ (Hz)} \tag{2.1}$$

Numa forma mais compacta, utilizando símbolos matemáticos podemos escrever:

$$\lambda = c/\nu \tag{2.2}$$

Exemplo: O que meu pai queria dizer quando falava que ouvia uma certa rádio na faixa de 49 metros?

Resposta: Estava querendo dizer que essa rádio, transmitindo em 6,1 MHz, emite ondas eletromagnéticas cujos picos de intensidade são afastados uns dos outros por uma distância igual a:

$$comprimento\ de\ onda = 300.000.000/6.100.000 \simeq 49\,\mathrm{m} \tag{2.3}$$

A equação 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:

$$Energia\ (Joule) = 6,6 \times 10^{-34} \times frequência\ (Hz) \tag{2.4}$$

ou, em forma matemática:

$$E = h\,\nu \tag{2.5}$$

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

Exercício: 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:

$$\frac{660.000}{6,6 \times 10^{-34} \times 10^{6}} = 10^{33}\ pacotes!! \tag{2.6}$$

A figura 2.6 identifica outras formas com que a radiação eletromagnética aparece na Natureza. 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: $1000\,\mathrm{Hz} = 10^3\,\mathrm{Hz}$, $10000\,\mathrm{Hz}$ $(10\,\mathrm{kHz}) = 10^4\,\mathrm{Hz}$, $1\,\mathrm{GHz} = 10^9\,\mathrm{Hz}$. A luz que nos ilumina tem frequência entre 10^{14} e $10^{15}\,\mathrm{Hz}$.

Figura 2.6: O espectro eletromagnético. Note as unidades, $1\,\mathrm{nm} = 0{,}000000001$ metros, ou $10^{-9}\,m$. Fonte: https://commons.wikimedia.org

O espectro emitido por uma fonte de radiação eletromagnética não pre-

cisa ser confinado a frequências bem definidas, como mostrado na figura 2.2 e 2.5. A maioria dos objetos no céu emite em faixas amplas de frequência. Tecnicamente isso se chama 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 2.8 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. Isso é expresso matematicamente pelas leis the Stefan-Boltzmann,

$$\text{Energia total} = \sigma T^4, \tag{2.7}$$

e lei de Wien,

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \ \mu\text{m}, \tag{2.8}$$

onde σ é a *constante de Stefan* e T sempre dada em graus K, ou seja, graus C + 273.

A característica da lei de Wien de que o espectro tem um máximo que se desloca para comprimentos de onda mais longos à medida que a temperatura diminui é muito importante no contexto dos *exoplanetas*. Hoje, há quase 4000 exoplanetas conhecidos. São planetas em torno de outras estrelas. No entanto, apenas 19 foram imageados diretamente até hoje. A razão para isso é que a energia luminosa emitida pela estrela e pelo são muito diferentes, o planeta sendo milhões de vezes mais fraco. Uma característica que ajuda, por outro lado, é a temperatura. Os planetas têm temperaturas muito mais

baixas (a Terra, por exemplo, 300 K). Significa que observando no infravermelho, o contraste aumenta muito em favor do planeta, e em alguns casos é possível vê-los. A figura 2.7 mostra uma imagem do primeiro exoplaneta detectado numa imagem direta. Note como ele, apesar de ser mais fraco, é muito mais vermelho que a estrela, de modo que mesmo ela sendo muito mais brilhante permite vê-lo claramente.

Figura 2.7: O primeiro exoplaneta imageado diretamente, na estrela 2M1207, com o exoplaneta 2M1207b (mais vermelho) próximo. Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/2M1207

Os espectros reais diferem dos espectros mostrados na figura 2.8 pela presença de absorções e emissões causadas por distintos elementos químicos que compõem as estrelas.

A figura 2.9 ilustra o fato de que o espectro das estrelas não é exatamente como a idealização da figura 2.8. A sequência mostra, de baixo para cima

Figura 2.8: O espectro eletromagnético aproximado de estrelas a diferentes temperaturas. Obtido em: http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/B/Blackbody+Radiation

estrelas muito quentes (a temperatura pode chegar a dezenas de milhares de graus), enquanto as mais frias têm apenas alguns mil graus. Para referência, o nosso Sol, uma estrela G2, possui temperatura na superfície de aproximadamente 5700 graus Kelvin. É interessante notar que a forma geral desses espectros é semelhante aos da figura 2.8, mas com algumas diferenças importantes. Uma delas é que os espectros estelares possuem *linhas espectrais*. Por exemplo, as linhas em 6563 Å (656.3 nm) e 4861 Å (486.1 nm) são provenientes do hidrogênio na atmosfera dessas estrelas. A presença das linhas espectrais é muito importante, pois permite que saibamos de que material uma estrela é feita e também saber as condições em que este material se encontra. As estrelas mais frias na figura 2.9, especialmente as de tipo K e M, possuem uma outra propriedade interessante: elas apresentam compostos na forma de moléculas em suas atmosferas. Isso faz com que os espectros difiram muito mais dos espectros de corpos negros mais quentes.

Figura 2.9: O espectro real de alguns tipos de estrelas. A temperatura diminui de baixo para cima, mais ou menos seguindo a cor dominante das estrelas. Compare com a figura 2.8. http://www.jb.man.ac.uk/distance/life/sample/stars/index.html

Outro aspecto de grande importância relacionado com a presença de raias bem definidas no espectro das estrelas diz respeito ao *estado de movimento* das estrelas. Da mesma forma como as ondas acústicas têm a frequência modificada quando se afastam ou se aproximam do observador, as ondas eletromagnéticas sofrem o mesmo efeito, ou seja, estão sujeitas ao *efeito*

Doppler. Esse efeito tem uma expressão bem simples,

$$\frac{v}{c} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \tag{2.9}$$

aqui, v é a velocidade com que a estrela está se afastando ou se aproximando de nós, c é a velocidade da luz, λ_0 é o comprimento de onda da raia espectral em repouso (ou seja, tal qual mediríamos no laboratório) e λ é o comprimento de onda observado para a mesma radiação. Note que foi usando essa expressão que Edwin Hubble descobriu a *expansão do Universo*, na década de 1920.

Outra aplicação importante da equação 2.9 é na determinação das massas das estrelas em sistemas binários. A figura 2.10 ilustra uma binária em três momentos: à esquerda, quando a componente vermelha se *afasta* de nós com maior velocidade. À direita, quando ela se *aproxima* de nós com maior velocidade. Note que o movimento oposto ocorre com a componente azul. No painel do centro, embora as componentes estejam se movendo, não há movimento na nossa direção. A abreviação CM refere-se à posição do centro de massa do sistema. Agora veja o que ocorre com as linhas espectrais (de um mesmo elemento) para ambas as componentes. No painel da esquerda, com a estrela vermelha se afastando de nós, a linha se desloca para comprimentos de onda maiores (veja Eq. 2.9). No painel da direita, o oposto: a linha se desloca para o azul. Para a outra estrela, ocorre o oposto. A Eq. 2.9 nos permite obter as velocidades máximas de afastamento e aproximação. O valor médio delas (ignorando o sinal) vai ser v_{verm} e v_{azul}. A relação entre as

massas das componentes (m_{verm}, m_{azul} e as velocidades é bem simples,

$$\frac{v_{verm}}{v_{azul}} = \frac{m_{azul}}{m_{verm}}. \tag{2.10}$$

Com algumas informações adicionais, pode-se obter os valores das massas individuais. Em alguns casos, a precisão na determinação das massas é melhor que 1%!

Figura 2.10: Um sistema binário com a representação do deslocamento Doppler da linha espectral de um mesmo elemento à medida que as estrelas se movem em órbita. Fonte: http://astro.if.ifurgs.br/bin/binarias.htm.

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 aceleradas, são produzidas por *massas* em movimento acelerado. Uma fonte importante de ondas gravitacionais são os sistemas binários envolvendo estrelas, estrelas compactas e buracos negros. 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 sexta potência da frequência com que o sistema binário gira.

Em 14 de setembro de 2015, as ondas gravitacionais foram observadas diretamente pela primeira vez. Foram geradas por uma colisão entre dois buracos negros. Essas ondas levaram 1.3 bilhões de anos para chegar até a Terra. A detecção de ondas gravitacionais (figura 2.11) é uma das maiores conquistas da humanidade, uma vez que esse fenômeno tem amplitude extremamente pequena. Enquanto as ondas sonoras podem facilmente ser medidas em escalas de milímetros ou mais, uma onda gravitacional apresenta amplitude muito menor que as dimensões de um *núcleo atômico*.

Figura 2.11: A primeira detecção de ondas gravitacionais. Os gráficos em vermelho e azul referem-se aos dois observatórios separados de 4000 quilômetros. Os painéis de baixo mostram como a frequência das oscilações foi mudando com o tempo. Fonte: Wikipedia.

Atualmente, pode-se dizer alguma coisa sobre como é o *espectro de on-*

das gravitacionais. Acredita-se que as oscilações ocorridas no Big Bang, ou seja na formação do Universo, estejam até hoje permeando o que se chama de espaço-tempo. Além disso, fenômenos transientes como o da figura 2.11 deixam sua assinatura por curtos intervalos de tempo, enquanto a superposição da emissão das fontes binárias na Galáxia deve produzir um espectro contínuo que nas próximas décadas será objeto de intensos estudos.

2.2 Efeitos de diluição de ondas e radiação

2.2.1 O meio ambiente e o espectro acústico

É uma experiência bem comum a percepção de 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 silencioso que seja o ambiente. A razão é explicada na figura 2.12, 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 interceptada pelo barco diminui, e ele chacoalha menos. Você pode provar facilmente, considerando o lago uma superfície bidimensional (2-D) onde a onda se propaga, que a energia por unidade de comprimento recebida por um observador distante cai com o *inverso da distância.* De modo geral, a energia recebida por um detector qualquer *diminui com a distância à fonte.* Se a fonte emite em *todas as direções no espaço* (3-D), a energia diminui com o *quadrado* da distância à fonte. Isso é ilustrado em forma gráfica na figura 2.13.

Figura 2.12: A diluição da energia da onda (por unidade de comprimento) com a distância à fonte.

Figura 2.13: A diluição da energia (por unidade de área) com a distância à fonte. De: http://projetosfisicaexperimental.blogspot.com.br/2016/03/lei-do-inverso-do-quadrado-da-distancia.html

O observador perspicaz percebe também que as intensidades de 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 a Terra é

$$\left(\frac{distância\ [Alfa\ Centauri]}{distância\ [Sol]}\right)^2 = \left(\frac{4 \times 10^{16}\ m}{1,5 \times 10^{11}\ m}\right)^2 = 7 \times 10^{10} \qquad (2.11)$$

70 bilhões de vezes menor que a energia recebida de nosso Sol.

A radiação eletromagnética também é absorvida pela atmosfera terrestre. 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 pôr do sol é muito mais fácil fazê-lo. Ao entardecer a luz tem que atravessar um caminho muito mais longo dentro da atmosfera e sofre maior atenuação. Veja esquematicamente na figura 2.14 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 mais 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 em 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. Algumas molé-

Figura 2.14: O caminho mais longo produz atenuação da luz ao atravessar a atmosfera terrestre. Fonte: autor

culas 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 lado, a própria atmosfera impede que observemos do solo certas frequências do espaço eletromagnético, emitidas pelos corpos celestes. Isso ocorre no ultravioleta, raios X, raios gama, infravermelho e rádio. A figura 2.15 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 cerca de 99% da atmosfera.

Figura 2.15: As janelas de observação a partir do solo. Obtido em: http://www.lna.br/ museuvirtual/evolucao.html

2.3 Detectores e telescópios

2.3.1 Detectores de ondas sonoras

O nosso tímpano, que é uma parte do ouvido, é um detector de ondas sonoras. 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. A vibração no tímpano é processada pelo nosso cérebro que analisa o espectro de frequências. Combinando o sinal de dois detectores (uma orelha de cada lado da cabeça) o cérebro é capaz de saber a orientação da fonte de sons. Caso o detector perca a sensibilidade, como acontece à medida que as pessoas vão envelhecendo, é possível realizar uma compensação aumentando a área coletora de ondas acústicas, por exemplo com o uso de um funil. Outra maneira de resolver o problema é usar um amplificador eletrônico para aumentar a intensidade dos sons.

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

2.3.2 Detectores e telescópios para ondas eletromagnéticas

O detector mais aprimorado que possuímos é o olho. A combinação olho e 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 detectores 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 rádio observatório que possui uma antena parabólica de 13 metros de diâmetro capaz de observar ondas de rádio em frequências de dezenas de giga-hertz. O maior radiotelescópio do mundo atualmente está na China, e tem uma antena de 500 metros de diâmetro. A figura 2.16 mostra uma configuração para detecção de ondas de rádio que foi projetada e construída na Divisão de Astrofísica do INPE: é uma das 50 antenas do experimento BINGO, que estudará a radiação dos estágios iniciais da formação do universo.

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 webcam 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 e intensidade da fonte emissora de luz.

Figura 2.16: Uma das 50 antenas do radiotelescópio BINGO, em construção na DAS/INPE. Fonte: L. Reitano.

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 no fato de que em Astronomia, é quase a regra estarmos na situação do surdo, não por falta de sensibilidade no detector, uma vez que os mais elaborados sistemas de amplificação são utilizados, mas porque as fontes celestes de radiação são extremamente fracas. A única maneira de remediar é aumentar a quantidade de radiação coletada. 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, infravermelha, para raios X e ondas gravitacionais.

A figura 2.17 mostra esquematicamente o "telescópio" mais simples que pode ser construído, com instruções mais detalhadas na figura 2.18. Ele funciona muito bem para luz e é capaz de registrar imagens. O único requisito é que as dimensões da abertura sejam pequenas, porém algumas vezes maiores que o comprimento de onda da radiação.

Figura 2.17: Exemplo de uma câmara pinhole, ilustrando a determinação da intensidade e direção da radiação eletromagnética.

Esse tipo de montagem já teve muita popularidade em um contexto não científico. Antes do advento da fotografia as "câmeras 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 detalhes o instrumento é capaz de discernir. A maior desvantagem desse tipo de "telescópio" é que a área coletora é muito pequena. A figura 2.18 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

Figura 2.18: Passo a passo de como construir uma câmara pinhole. Obtida em https://www.jornalufgonline.ufg.br/n/30640-camera-pinhole

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. A figura 2.19 mostra o telescópio ProtoMirax com o padrão de aberturas já instalado na parte superior.

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. 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 figura 2.17, mantendo a capacidade de separar raios vindos de direções diferentes. Nas lojas de lembranças é fácil encontrarmos lupas que

Figura 2.19: O telescópio ProtoMirax para raios X, com o padrão de aberturas na parte superior. Fonte: autor.

podem ser usadas como lentes (o termo técnico é *objetiva*) para um telescópio simples. A figura 2.20 ilustra como montar.

Figura 2.20: Esquema de um telescópio simples. Fonte: autor.

Para determinar o comprimento do canudo que compõe a parte externa do telescópio meça primeiro a distância da lente em que uma cena bem iluminada forma uma imagem bem definida. Se você utilizar dois canudos de diâmetros diferentes, 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". Se tivesse um detector CCD ou CMOS teria uma câmara digital.

O telescópio de 1,6 metros de diâmetro no Laboratório Nacional de Astrofísica, em Brasópolis MG (figura 2.21, 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

Figura 2.21: O telescópio de 1,6-m de diâmetro do Laboratório Nacional de Astrofísica, no Pico dos Dias, Sul de Minas Gerais. Fonte: autor.

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, Canadá, Chile, Argentina e Brasil. Um dos telescópios opera nos andes chilenos e o outro numa montanha de 4200 metros de altitude no Havaí. O telescópio GMT (do ingles *Giant Magellan Telescope*, figura 2.22), que vai

operar dentro de alguns anos nos andes chilenos e no qual os astrônomos do estado de São Paulo têm participação, possui um espelho composto que é equivalente a uma abertura de 26 metros de diâmetro! Astrônomos da DAS/INPE participam desse projeto.

Figura 2.22: Visão artística de como será o GMT, com abertura de 26-m de diâmetro. Fonte: https://www.gmto.org/

Exercício: Quantas vezes mais luz o telescópio do Projeto GMT é capaz de captar com relação ao telescópio instalado em Brasópolis?

Resposta: A capacidade de captar radiação é proporcional à área. A área de um círculo é proporcional ao diâmetro ao quadrado. Então:

$$\frac{\text{Área } GMT}{\text{Área } Brasópolis} = \left(\frac{26}{1,6}\right)^2 = 264 \textit{ vezes mais luz!} \tag{2.12}$$

Capítulo 3

O SISTEMA SOLAR*

Cláudia Vilega Rodrigues**

*Revisado em Junho/2008.

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

O SISTEMA SOLAR

3.1. INTRODUÇÃO....3
3.2. A EVOLUÇÃO DO CONHECIMENTO SOBRE O SISTEMA SOLAR E UM POUCO DE DINÂMICA. .3
3.3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA SOLAR....11
3.3.1. O SOL....12
3.3.2. OS PLANETAS E SEUS SATÉLITES....15
3.3.2.1. MERCÚRIO....19
3.3.2.2. VÊNUS....19
3.3.2.3. A TERRA....21
3.3.2.4. MARTE....25
3.3.2.5. JÚPITER....26
3.3.2.6. SATURNO....27
3.3.2.7. URANO....28
3.3.2.8. NETUNO....29
3.3.3. PLANETAS-ANÕES....30
3.3.3.1. PLUTÃO....31
3.3.3.2. ÉRIS....32
3.3.4. CORPOS MENORES DO SISTEMA SOLAR....33
3.3.4.1. ASTERÓIDES....33
3.3.4.2. COMETAS....34
3.3.5. METEOROS, METEORITOS E METEORÓIDES....35
3.4. A FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR....37
3.5. EXISTEM OUTROS SISTEMAS PLANETÁRIOS NO UNIVERSO?....40
3.6. BIBLIOGRAFIA....41

3.1. INTRODUÇÃO

O sistema solar é formado por um miríade de corpos. Quais e o que são esses astros? Como são classificados? 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 discorrer um pouco sobre o conhecimento atual que temos sobre o sistema solar.

3.2. A EVOLUÇÃO DO CONHECIMENTO SOBRE O SISTEMA SOLAR E UM POUCO DE DINÂMICA

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

Uma curiosidade que sempre esteve presente na Humanidade é entender o Universo que a cerca e do qual faz parte. O sistema solar, até há poucos séculos, constituía todo o Universo conhecido. É relativamente recente a noção de que as estrelas que vemos no céu são astros similares ao Sol; mas muito mais distantes. Como já foi dito no Capítulo 1, a observação do céu noturno, ainda na Antigüidade, mostrou ao Homem que alguns astros se movimentam contra um fundo de "estrelas fixas". Esses objetos celestes foram chamados planetas pelos gregos, que significa astro errante. Para os gregos os planetas eram a Lua, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno, além do Sol, que também tem um movimento diferente daquele das estrelas. Hoje o significado da palavra planeta é diferente. Já faz alguns séculos que não mais chamamos a Lua de planeta. Plutão, por outro lado, deixou de ser classificado como planeta recentemente (em 2006). A ciência é dinâmica, podendo revisar conceitos a partir de uma maior compreensão de um dado objeto. Se, por um lado, o fato da Lua girar em torno da Terra

é bastante difundido e já a coloca em uma classificação diferente da própria Terra que gira em torno do Sol, por que Plutão, que gira em torno do Sol como a Terra, não é mais considerado planeta? O que são os hoje chamados planetas? Isso ficará claro na Seção 3.3.

FIGURA 3.1 - O MODELO GEOCÊNTRICO.

Muito se pensou sobre a distribuição dos astros no céu e se ela de algum modo relaciona-se a uma organização do Universo. O modelo que dominou o pensamento filosófico europeu até o século XVI é o chamado modelo geocêntrico. Geo, em grego, significa Terra. Assim, modelo geocêntrico é aquele que coloca a Terra no centro do Universo. Nesse modelo, todos os astros orbitavam em torno do centro, ou seja, da Terra. É importante lembrar que o Universo dessa época era formado pelo Sol, Terra, planetas e estrelas fixas. Assim, o nosso conceito de sistema solar, como parte de um Universo muito maior, não existia. Assim a Terra, ao ocupar o centro das órbitas dos "planetas", estava ocupando o centro do Universo e não do sistema solar. Esse modelo foi sistematizado por Ptolomeu (astrônomo, matemático e geógrafo) no século II, a

partir de idéias preexistentes. A distância de um planeta à Terra era considerada proporcional ao tempo gasto por ele para completar uma volta ao redor da Terra - isto é, retornar ao mesmo ponto do céu em relação às estrelas fixas. Assim, chegava-se a representação do Universo esboçada em duas dimensões na Figura 3.1. As estrelas fixas ficavam todas a uma mesma distância, muito maior do que a do planeta considerado o mais distante na época, Saturno. Hoje sabemos que a distância entre uma estrela e a Terra pode ser muitíssimo diferente daquela de outra estrela aparentemente vizinha da primeira - veja o capítulo sobre estrelas para mais detalhes. O modelo geocêntrico não era apenas um modelo filosófico do Universo, era também um modelo matemática que reproduzia com muita precisão as observações dos planetas. Não obstante, para explicar corretamente os movimentos e brilhos observados dos planetas, o modelo ptolomaico necessitava de uma série de complicações geométricas, como os eqüantes e deferentes, que são também representados na Figura 3.1.

Com o objetivo de explicar com mais simplicidade o movimento dos planetas, o astrônomo polonês Nicolau Copérnico (1473-1543) propôs, em 1543, o **Modelo Heliocêntrico**: Hélio, em grego, significa Sol. Nesse modelo o Sol encontrava-se no centro do Universo 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). Outros já haviam proposto um Universo com o Sol na posição central, Aristarcos de Samos (281 a.C.) e Nicolas de Cusa (1401-1464), porém, sem maiores repercussões. Essas propostas não incluam um tratamento matemático, o que só feito por Copérnico. Seu modelo heliocêntrico era mais simples e, tal como o modelo de Ptolomeu, explicava e previa os movimentos planetários. Além disso, Copérnico determinou os raios e períodos das órbitas dos planetas com uma precisão muito boa, apesar de considerá-las circunferências, o que, como veremos adiante, não é correto Hoje essa configuração do Sol e planetas nos parece bastante natural, mas esse modelo não foi muito bem aceito na época de Copérnico. Esse modelo tirava a Terra e, portanto o Homem, do centro do Universo. Ele era contrário a um paradigma de muitos séculos, baseado na tradição clássica, e seriam necessários argumentos fortes para modificar a visão do Universo ortodoxa.

FIGURA 3.2 - O MODELO HELIOCÊNTRICO.

O astrônomo e físico italiano Galileu Galilei (1564-1642), no início do século XVII, foi o primeiro a observar o céu com o auxílio de um telescópio. Deve ser notado que naquela época não se esperava que a observação do céu com um instrumento pudesse revelar algo de novo. Mas, Galileu mostrou isso não era verdade: o céu se modifica ao ser observado com um telescópio. Os objetos celestes, que na visão clássica deveriam ser perfeitos, começaram a se mostrar mais complexos com o telescópio de Galileu: Vênus possui fases, Júpiter tem satélites, Saturno tem disco, a Via Láctea é uma grande concentração de estrelas que se multiplicam com o poder de aumento do telescópio. Essas observações corroboravam o modelo heliocêntrico. Tanto por mostrar que a concepção anterior do Universo não era correta, mas também com argumentos geométricos. As fases de Vênus como observadas por Galileu somente seriam explicadas se o modelo heliocêntrico fosse o correto. É importante também citar que

Galileu obteve vários resultados experimentais sobre os movimentos dos corpos que ajudaram a compor a base do trabalho de Newton (veja adiante).

O modelo de Copérnico, porém, ainda possuía problemas. Ele considerava as órbitas dos planetas circunferências perfeitas e para explicar corretamente os movimentos observados eram necessários artifícios geométricos, exatamente como acontecia com o modelo geocêntrico de Ptolomeu. Foi o astrônomo alemão Johannes Kepler (1571-1630), no início do século XVII, quem mostrou que as órbitas planetárias eram elípticas. Para isso, ele contou com as observações do astrônomo dinamarquês Tycho Brahe (1546-1601), do qual foi assistente durante o último ano de vida e sucessor como responsável pelo observatório de Uraniborg (na época pertecente à Dinamarca, agora dentro dos limites da Suécia). Os dados obtidos por Tycho Brahe eram os mais precisos da época e no limite do que o olho humano, sem auxílio de instrumentos de aumento como o telescópio, pode conseguir. E foi tentando explicar esses dados, principalmente os da órbita de Marte – que não eram compatíveis com o modelo de Copérnico com órbitas circulares – que ele propôs três leis que descrevem corretamente os movimentos dos planetas: as **Leis de Kepler**. As duas primeiras foram apresentadas simultaneamente (1609) e são o resultado de sua tentativa de descrever corretamente os movimentos planetários. A terceira lei, determinada dez anos mais tarde (1619), relaciona os períodos e tamanhos das órbitas e, de certa forma, traduz uma certa harmonia entre os movimentos dos corpos, o que talvez fosse o principal objetivo de Kepler.

- Primeira Lei – Lei das órbitas elípticas: A órbita de um planeta é uma elipse (veja quadro adiante) com o Sol em um dos focos. Assim, as distâncias entre um planeta e o Sol são variáveis ao longo da translação do planeta.
- Segunda Lei - Lei das áreas: Ao longo de sua órbita, um planeta possui uma velocidade variável, de modo que a área coberta pela linha que liga o Sol ao planeta é sempre a mesma em intervalos de tempo iguais (Fig. 4.17).
- Terceira Lei – Lei Harmônica : A razão entre o quadrado do período de translação, P, de um planeta e o cubo do semi-eixo maior de sua órbita, a, é a mesma para todos os planetas:

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

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.

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

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

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

FIGURA 3.3 - LEI DAS ÁREAS.

Com o trabalho de Kepler passou-se a saber *como* os planetas se movimentavam ao redor do Sol. Mas ainda restava uma pergunta básica: *por quê?* Foi só com a **Teoria da Gravitação Universal** do físico e matemático inglês Isaac Newton (1643-1727), publicada em 1687, que isso foi respondido. A teoria da gravitação mostra que os corpos se atraem uns aos outros, isto é, um corpo cria em torno de si um campo gravitacional que é sentido por todos os outros corpos. Esse campo gravitacional é tanto mais intenso quanto maior a massa do corpo e decresce proporcionalmente ao quadrado da distância. Em termos matemáticos, essa lei é expressa pela equação:

$$F_G = G\frac{M_1 M_2}{R^2}, \quad (3.1)$$

onde: F_G é a força gravitacional,

G é a constante gravitacional;

M_1 é a massa de um dos corpos;

M_1 é a massa de um dos corpos e

R é a distância entre os dois corpos.

Essa força mantém a Terra ligada ao Sol, e a Lua, à Terra. De modo geral, o sistema solar possui um campo gravitacional (devido principalmente ao Sol) que mantém todos os corpos (planetas, cometas, asteróides, entre outros) ligados. 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. Isso é expresso pelas **Três Leis do Movimento**, que são:

1. Qualquer corpo permanece em seu estado de repouso, ou de movimento retilíneo uniforme, a menos que seja compelido a mudar de estado por uma força externa.
2. A taxa de variação da quantidade de momento é proporcional à força impressa e na mesma direção em que a força age. Matematicamente, temos

$$\vec{F}=\frac{d\vec{p}}{dt} \text{ que equivale a:}$$

$$\vec{F}=m\vec{a}\ ,$$

onde $\vec{F}$ é a força;

$\vec{p}$ é o momento,

t é o tempo,

m é massa e

$\vec{a}$ é aceleração.

3. A cada ação corresponde uma reação de mesma intensidade e sentido oposto.

Essas leis são discutidas em qualquer livro de mecânica de graduação. Sugerimos, aos interessados, a leitura do "Curso de Fisica Básica: 1 – Mecânica" de H. M. Nussenzveig.

Com esses dois fundamentos – a Lei da Gravitação Universal e as Leis do Movimento - foi possível entender a dinâmica do sistema solar: isto é, como e porque se dão os movimentos. Em "Os Princípios Matemáticos da Filosofia Natural", o "Principia", Newton não só demonstra as leis de Kepler e calcula fenômenos conhecidos como as marés e a precessão dos equinócios, mas também prevê e determina a forma achatada da Terra. A partir daí, estava aberto o caminho para o desenvolvimento da astronomia (e da física) moderna.

Desse modo, no final do século XVIII, os movimentos dos maiores corpos do sistema solar eram explicados tanto do ponto de vista de sua descrição, como de sua causa. Porém, como o sistema solar surgiu? O filósofo alemão Immanuel Kant (1724-1804) foi o primeiro a propor a hipótese nebular em 1755, que foi posteriormente desenvolvida pelo matemático francês Pierre-Simon de Laplace (1749-1827). Ela considera que o sistema solar formou-se a partir de uma nuvem de gás e poeira em rotação (veja a Seção 3.4 e o Capítulo sobre Formação Estelar). Apesar de outras teorias terem surgido, esta é ainda a teoria mais aceita sobre a formação do sistema solar e do Sol e é corroborada por observações de outras estrelas.

Uma grande parte do nosso conhecimento do sistema solar, em particular, o referentes aos planetas e seus satélites, é proveniente da exploração espacial iniciada por volta de 1960. Uma grande quantidade de sondas passaram muito próximas a (em alguns casos pousaram em) planetas, satélites e mesmo cometas do sistema solar, o que contribuiu e contribui de modo inigualável para nossa compreensão dessa pequena parte do Universo que nos rodeia.

No momento, estamos passando por uma nova fase de conhecimento sobre sistemas planetários: estamos descobrindo planetas em torno de outras estrelas - veja a Seção 3.5. Essas novas descobertas ampliarão o nosso horizonte sobre as nossas origens.

3.3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA SOLAR

O sistema solar inclui o Sol e os planetas, mas abrange bem mais do que isso. Os cometas, asteróides, planetóides, entre outros objetos, compõe o sistema solar. Nesta seção vamos falar um pouco sobre cada uma dessas classes de objetos. Porém, vamos inicialmente discutir um pouco das características do sistema solar como um todo.

Como podemos definir o que é e como é composto o sistema solar? No Universo, a distribuição e hierarquia dos objetos são regidas basicamente pela força gravitacional. Como o Sol é formado por uma grande quantidade de matéria concentrada em uma região relativamente pequena, ele é um foco de atração que reúne em torno de si vários corpos. Assim, uma das definições para o sistema solar é: o

conjunto de todos os corpos (ou matéria) cujo principal centro de atração é o Sol. Ela não é a única, porém, a consideramos a melhor.

Como já mencionado anteriormente, a força gravitacional pode manter dois corpos unidos. Vamos considerar, por exemplo, a Terra e a Lua. Sabemos que é a força gravitacional que as mantém unidas, mas, se a força é de atração e na direção da linha que une os seus centros, por que, então, esses dois corpos não colidem? Isso acontece devido à rotação. A quantidade de rotação de um corpo com relação a um ponto é medida por uma grandeza chamada *momento angular*. O momento angular de um sistema deve ser conservado e isso explica o movimento orbital dos corpos.

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

No parágrafo anterior dissemos que os planetas giram em torno do Sol. Isto não é absolutamente correto. Os planetas giram em torno do centro de massa do sistema solar (veja quadro sobre centro de massa no Capítulo 1). Aliás, o próprio Sol, além de rotacionar, 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 do tempo essa distância pode ser desprezada e o Sol pode ser considerado o centro do sistema solar.

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

3.3.1. O SOL

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

FIGURA 3.4 – IMAGEM DO SOL NA LINHA DE EMISSÃO K DO CAII OBTIDA NO NATIONAL SOLAR OBSERVATORY (NSSDC).

Como já foi mencionado, o Sol é o centro gravitacional do sistema solar. Em torno dele orbitam os outros corpos, e é ele que mantém o sistema coeso. Mas, o que é o Sol? O Sol é uma estrela. Dentre as estrelas existentes no Universo, o Sol pode ser classificado como uma estrela típica, das mais comuns que existem no Universo. Por ser uma estrela, o Sol é uma fonte de energia. De toda energia existente na superfície da Terra, a maior parte é proveniente do Sol que fornece 99,98% dela. O brilho dos corpos do sistema solar é constituído, basicamente, pela reflexão da luz solar em sua superfície.

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

O Sol é uma esfera gasosa cuja temperatura na superfície é de cerca de 5.500 graus centígrados. No núcleo solar a temperatura atinge 15 milhões de graus. Sua massa é 333 mil vezes maior que a da Terra, mas a sua densidade média é de apenas 1,41 gramas por centímetro cúbico, pouco maior que a da água que é de 1 grama por centímetro cúbico. Sua massa é composta por 73% de hidrogênio, o primeiro elemento químico da tabela periódica, e também o mais abundante no Universo. O restante é constituído basicamente por hélio. Apenas 0,1 % da massa do Sol é composta por elementos mais pesados. A Tabela 3.1 mostra alguns dados relativos ao Sol.

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

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

*Veja na Tabela 3.4 os valores relativos à Terra.

É no núcleo solar, com sua altíssima temperatura, que ocorrem as reações nucleares de produção de energia. Essa energia é transportada até a superfície através de camadas que envolvem o núcleo, denominadas envoltórios. Na camada logo abaixo da superfície solar ocorre o processo de convecção do gás que aflora à superfície. A convecção é uma das formas pelas quais a energia é transportada de um local para outro

(ver quadro sobre Formas de Transporte de Energia). As porções mais internas do gás, aquecidas pela radiação que vem do núcleo, expandem-se e sobem até a superfície, onde perdem energia e esfriam. Ao esfriarem, tornam-se mais densas e pesadas, voltando a descer. É devido a esse processo, chamado convectivo, que a superfície do Sol apresenta-se coberta por grãos. Observando-se a superfície solar com grande ampliação os padrões de granulação se assemelham às bolhas de gás quente transportando a energia do interior para a superfície.

FORMAS DE TRANSPORTE DE ENERGIA

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

Condução: Quando uma colher de metal se aquece ao ser mergulhada em uma xícara de chá quente, a energia está sendo transportada por condução do chá para a colher.

Convecção: Quando você esquenta 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. Imagine-se em uma praia tomando refrigerante em uma latinha em um dia quente de verão. Você deixou a latinha no sol e quando foi recolhê-la, ela estava muito quente. Nesse caso, foi a radiação (no caso solar) que aqueceu a lata, transportando calor do sol para a lata.

O Sol encontra-se a uma distância média de 150 milhões de quilômetros da Terra. Isso equivale a cerca de 8 minutos-luz, isto é, a luz do Sol demora esse tempo para chegar à Terra. A segunda estrela mais próxima é Próxima Centauri, que se encontra a uma distância 270 mil vezes maior, assim sua luz demora 4 anos e 4 meses para chegar até nós! Pela sua proximidade, podemos estudar o Sol melhor do que

qualquer outra estrela do Universo. Mais detalhes sobre a estrutura do Sol são apresentados no Capítulo 4.

3.3.2. OS PLANETAS E SEUS SATÉLITES

Ao observarem continuamente o céu, os antigos perceberam a existência de pelo menos dois tipos de objetos. Enquanto a imensa maioria dos pontinhos brilhantes no céu, as estrelas, possuía posições relativas imutáveis, alguns poucos pontos pareciam passear por entre elas. Esses objetos foram chamados planetas, que em grego significa errante. A definição atual de planeta é um corpo que orbita em torno do Sol (ou de outra estrela), possui forma esférica devido a sua própria gravidade e cuja órbita não contenha outro corpo similar que orbite em torno do Sol.

Com a definição acima, os planetas do sistema solar são oito. Em ordem de proximidade ao Sol são eles: Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno. Algumas de suas características orbitais são listadas na Tabela 3.2 e alguns dados físicos na Tabela 3.3. Cinco deles são observáveis a olho nu: Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno. A Lua também foi considerada um astro errante na antiguidade, mas pela definição atual, ela é um satélite. Enquanto um planeta orbita em torno do Sol, um satélite orbita em torno de um planeta. Porém, do ponto de vista de composição e características físicas, os planetas e satélites podem ser muito parecidos. Ganímede, por exemplo, é o maior satélite de Júpiter, com raio da ordem de 2.600 quilômetros, maior portanto que Mercúrio, que possui um raio de 2.440 quilômetros.

Os planetas podem ser divididos em dois tipos: telúricos (similares à Terra) e jovianos (similares a Júpiter). Os planetas telúricos são: Mercúrio, Vênus, Terra e Marte. Os jovianos são: Júpiter, Saturno, Urano e Netuno. Plutão, que foi até 2006 considerado um planeta, era um problema para essa classificação, já que não se enquadrava em nenhuma das categorias acima e, como veremos adiante, parece um grande cometa. Plutão é hoje considerado um planeta-anão. Abordaremos essa classe de objetos na Seção 3.3.3.

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

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

* O semi-eixo maior da órbita refere-se ao valor relativo ao terrestre.
** Veja Seção 3.4 para definição de excentricidade.

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

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

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

* Nesta tabela, 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.

A existência de uma atmosfera depende da massa do planeta e de sua temperatura. Esta, por sua vez, depende inicialmente da sua distância ao Sol. Os planetas menores e mais quentes (mais próximos do Sol) têm mais dificuldade em manter uma atmosfera. Por outro lado, os elementos mais leves escapam mais facilmente do planeta. Assim, os planetas telúricos tendem a reter quase que somente elementos mais pesados em sua atmosfera. Já os planetas gigantes conseguem reter uma maior quantidade de material, inclusive os elementos mais leves. A atmosfera faz diminuir a variação de temperatura na superfície entre o dia e a noite, que é determinada pela irradiação solar. Quando a atmosfera é densa o suficiente, ela não permite que o calor recebido durante o dia escape à noite e diminui.

Os planetas não possuem luz própria. Estritamente falando, podem possuir uma fonte muito pequena de energia, mas que não é originada pela fusão nuclear, que é a fonte de energia das estrelas. A maior parte da energia que irradiam corresponde à luz do Sol que é refletida em sua superfície. Assim, como um farol de bicicleta, tipo olho de gato, parece aceso quando alguma luz incide sobre ele. Porém, existe um pequeno

excesso de energia (com relação à recebida pelo Sol) que pode ser de origem gravitacional ou radioativa. Esse excesso é maior nos planetas jovianos.

Apesar de pequena, a energia interna dos planetas telúricos e dos grandes satélites é suficiente para modificar sua crosta através de atividade geológica: vulcanismo e movimentos tectônicos. Os planetas jovianos não possuem crosta, pois são gasosos. Outros mecanismos que determinam a aparência da crosta de um planeta ou satélite são: a erosão, causada pela atmosfera ou hidrosfera; e o crateramento. Este último ocorre em todos os planetas internos e satélites de superfície sólida. Desse modo, a análise da crosta permite determinar a época de formação de um dado terreno e o estado atual de atividade do corpo, como veremos ao descrevermos alguns planetas.

3.3.2.1. MERCÚRIO

Mercúrio é o planeta mais próximo do Sol. Seu nome latino corresponde ao do deus grego Hermes, filho de Zeus. Bastante pequeno, é o 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 ocorrido atividade recente, as lavas teriam cobrido e apagado as crateras. Das inúmeras crateras existentes, destaca-se a Bacia Caloris, com 1.300 quilômetros de diâmetro, quase 1/3 do diâmetro do planeta que é da ordem de 4.890 quilômetros.

Possui uma atmosfera muito tênue, quase desprezível, por isso existe uma incrível variação da temperatura entre o dia e a noite: de –170 graus (lado oculto do Sol) a +430 graus centígrados (lado iluminado pelo Sol). Compare com a Terra, onde a variação é de poucas dezenas de graus. Sua órbita é altamente excêntrica, isto é, se desvia muita da forma circular.

FIGURA 3.5 – MOSAICO DE IMAGENS DO PLANETA MERCÚRIO OBTIDAS COM A SONDA MARINER 10 (NSSDC).

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 que esperaríamos fosse mais quente. As nuvens de Vênus são formadas por várias

substâncias, entre elas o ácido sulfúrico. A pressão atmosférica de Vênus é bastante alta, cerca de 100 vezes maior que a da Terra. Existem também evidências de vulcanismo, que está relacionado ao manto convectivo. Por tudo isso, a superfície de Vênus possui condições bem inóspitas.

FIGURA 3.6- O PLANETA VÊNUS OBSERVADO PELA SONDA GALILEO (NSSDC).

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

3.3.2.3. A TERRA

Terra é o nome da deusa romana, esposa do Céu. Como já vimos, o planeta em que vivemos era considerado até o Renascimento como em posição privilegiada, em torno da qual o Universo se organizava. Com o avanço do nosso conhecimento, a Terra deixou de ocupar um lugar especial e passou a ser apenas mais um dos planetas de uma estrela comum, o Sol. Porém, ainda hoje é considerada particular, pela existência e complexidade da vida em sua superfície. A temperatura na Terra é tal que permite que a

água exista no estado líquido*. Aliás, o nosso planeta deveria ser chamado de planeta Água e não Terra, pois 3/4 de sua superfície são cobertos pela água. Apenas para se ter uma idéia da quantidade de água dos oceanos, se a superfície do planeta se aplainasse, o planeta seria coberto por um oceano de 400m de profundidade. A água é um dos fatores essenciais que levou à existência da vida.

EFEITO ESTUFA

O Sol emite a maior parte de sua energia na forma de luz visível. Essa radiação ao atingir a superfície de um planeta é transformada em radiação infravermelha. O efeito estufa é produzido por certos gases na atmosfera, em especial o gás carbônico. A absorção da radiação por esses gases é maior na região infravermelha do que na região visível. Assim, mais radiação visível do Sol penetra a atmosfera e alcança a superfície do planeta do que radiação infravermelha escapa para o espaço, o que faz com que parte da energia fique retida entre a atmosfera e a superfície do planeta. O resultado é que a atmosfera próxima à superfície fica aquecida. Esse efeito é similar ao que acontece nos carros. A luz visível entra pelo vidro e é transformada em radiação infravermelha, que o vidro não deixa escapar. Assim, o interior do carro se aquece. É o que acontece com Vênus, e também com a Terra, por motivos naturais. Mas, existem evidências que 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.

A atmosfera terrestre é formada basicamente por nitrogênio (78 %), que faz com que o nosso planeta seja azul quando visto de fora. Existem, porém, outros gases. Entre eles devemos salientar o oxigênio (20 %) e o ozônio, que bloqueiam a radiação ultravioleta do Sol, que é fatal para alguns microorganismos e prejudicial para os seres vivos em geral. O oxigênio da atmosfera terrestre é basicamente produzido pelas

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

plantas, através da fotossíntese. Hoje, a atmosfera possui uma pequena quantidade de gás carbônico, porém ela já deve ter sido muito maior, mas foi consumida por vários processos. Assim, atualmente o efeito estufa é muito menor na Terra do que é em Vênus.

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

FIGURA 3.7- MOSAICO DE IMAGENS DO PLANETA TERRA OBTIDAS COM A SONDA CLEMENTINE (NSSDC).

O nosso planeta possui um satélite, a familiar Lua. Sua superfície é coberta por crateras de impacto, principalmente a 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. Como exemplo podemos citar, Ganímedes, um dos satélites de Júpiter: sua massa é 10.000 vezes menor que a do planeta. O tamanho da Lua é apenas 1/4 do da Terra. Assim, do ponto de vista físico, o conjunto Terra-Lua poderia ser definido como um sistema binário.

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

FIGURA 3.8 – IMAGEM DA LUA CHEIA OBTIDA PELA APOLLO 11 (NSSDC).

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

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

3.3.2.4. MARTE

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

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

FIGURA 3.9 – IMAGEM DO PLANETA MARTE OBTIDA COM O HUBBLE SPACE TELESCOPE (STScI).

3.3.2.5. JÚPITER

Júpiter é o maior planeta do sistema solar, sendo seu raio cerca de 11 vezes maior que o da Terra e, portanto, 1/10 do raio solar. É o protótipo dos planetas jovianos, os gigantes gasosos. Coincidentemente, o seu nome latino corresponde em grego a Zeus, o maior dos deuses do Olimpo. Apesar de possuir, provavelmente, um núcleo formado por materiais pesados, ele é composto basicamente por hidrogênio e hélio na forma gasosa. Assim, Júpiter, como os demais planetas jovianos, não possui uma superfície sólida como os planetas terrestres.

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

FIGURA 3.10 – IMAGEM DO PLANETA JÚPITER E SEU SATÉLITE IO OBTIDA PELO HUBBLE SPACE TELESCOPE (STScI).

Hoje conhecemos 63 satélites de Júpiter, mas esse número continua a crescer em virtude de novas descobertas. Entretanto, quatro deles destacam-se por seu tamanho: Io, Europa, Ganímedes e Calisto. São chamados satélites galileanos, pois foram descobertos por Galileu, no início do século XVII. Ganímedes é o maior satélite do sistema solar. Io e Europa são similares aos planetas telúricos, formados basicamente por rochas. Io possui vulcões ativos e Europa uma atmosfera de oxigênio, além de um possível oceano de água líquida sob uma crosta de gelo. De todos os satélites do sistema solar, apenas 5 possuem atmosferas: Europa, Io, Ganímedes, Titã (Saturno) e Tritão (Netuno).

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

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

3.3.2.6. SATURNO

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

contrastantes entre si que as de Júpiter. Também, como Júpiter, possui uma pequena fonte de calor interna.

FIGURA 3.11 – IMAGEM DO PLANETA SATURNO OBTIDA PELA VOYAGER 2 (NASA).

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

Saturno possui ao menos 60 satélites. Um satélite bastante peculiar é Titã. É o segundo maior satélite do sistema solar. Possui um núcleo rochoso, recoberto por um manto de gelo de compostos orgânicos. Sua espessa atmosfera é formada principalmente por nitrogênio e contém também moléculas orgânicas complexas, estrutura que se supõe ser similar à atmosfera terrestre primitiva. A temperatura máxima na superfície de Titã é de -100 graus centígrados.

3.3.2.7. URANO

Até agora falamos apenas de planetas conhecidos desde a Antigüidade. Urano foi o primeiro dos planetas a serem descobertos na era moderna, em 1781, pelo

astrônomo inglês de origem alemã William Herschel (1738-1822). Urano, cujo nome refere-se ao deus grego que personifica o céu, deve possuir um núcleo rochoso similar ao da Terra recoberto por um manto de gelo. Assim, ele é diferente de Júpiter e Saturno na estrutura interna. Sua atmosfera é composta basicamente por hidrogênio e hélio, mas contém também um pouco de metano. Possui também bandas atmosféricas, como os demais planetas jovianos.

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

FIGURA 3.12 - O PLANETA URANO COM SEU DISCO E SATÉLITES. IMAGEM OBTIDA COM O HUBBLE SPACE TELESCOPE (STScI).

Esse planeta possui 27 satélites conhecidos, todos compostos principalmente por gelo. Dentre suas maiores luas, a mais próxima de Urano é Miranda. Ela possui um relevo bastante particular, formado por vales e despenhadeiros.

3.3.2.8. NETUNO

Logo após a descoberta de Urano, foi notado que os cálculos matemáticos não reproduziam com exatidão a sua órbita. Foi então sugerido que existiria um outro

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

FIGURA 3.13 – IMAGENS DOS DOIS HEMISFÉRIOS DO PLANETA NETUNO OBTIDAS COM O HUBBLE SPACE TELESCOPE (STScI).

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

3.3.3. PLANETAS-ANÕES

Como já falado anteriormente, o sistema solar é composto por mais corpos que apenas o Sol, planetas e seus satélites. Uma classe recentemente definida de corpos, mas que contém corpos conhecidos já há bastante tempo, é a dos planetas-anões.

Desde o final do século XX, a classificação de Plutão estava sendo discutida. Com a exploração espacial, ficou claro que Plutão era bastante diferente dos demais planetas. Apesar de sua grande distância ao Sol, não era um grande planeta, ao contrário era o menor dos planetas. Só isso já impedia de encaixá-lo na classificação usual de planetas telúricos e jovianos. As características de sua órbita também não ajudavam: muito excêntrica e inclinada com relação à eclíptica. Apesar dessas diferenças, ele ainda continuava sendo classificado como planeta. Porém, nos últimos anos começaram a ser descobertos vários objetos de tamanho similar à Plutão, que também orbitavam o Sol, e com distâncias ao Sol muito próximas das de Plutão. Assim, a órbita de Plutão contém vários corpos similares a ele. E isso faz a diferença entre um planeta e um planeta-anão. Enquanto o primeiro está sozinho, ou com seus satélites, em sua órbita, os planetas-anões podem ter companheiros de órbita que não são os seus satélites. Essa definição foi consolidada em 2006, em uma reunião da União Astronômica Internacional, que é o fórum máximo da astronomia mundial.

Desse modo um planeta-anão é definido como um corpo que orbite em torno do Sol, esférico devido a sua própria gravidade, que não possua fusão nuclear interna e cuja órbita esteja localizada em uma região do sistema solar que possua outros corpos orbitando em torno do Sol.

Hoje são reconhecidos como planetas-anões três corpos: Plutão, Ceres e Éris. Ceres localiza-se no cinturão de asteróides entre Marte e Júpiter, e falaremos mais sobre ele na seção de asteróides. Os planetas-anões localizados além da órbita de Netuno são chamados de plutóides. São eles: Plutão e Éris. É possível que outros plutóides venham a ser descobertos no futuro.

3.3.3.1. PLUTÃO

Plutão foi descoberto em 1930, pelo americano Clyde Tonbaugh. Plutão, na mitologia, é o deus romano do mundo dos mortos, mundo este chamado de Hades pelos gregos. Sua órbita é tão excêntrica, que sua distância ao Sol pode variar em 40%. Devido a isso, sua órbita e a de Netuno se interceptam, de modo que em algumas situações Netuno está mais afastado do Sol que Plutão. Sua distância ao Sol varia entre aproximadamente 30 e 49 Unidades Astronômicas (a distância média entre a Terra e o Sol)

Ele é menor que qualquer dos planetas, com raio de 2.300 quilômetros. Mercúrio, o menor dos planetas, possui raio de 2.440 quilômetros, um pouco maior portanto. Sua distância e tamanho tornam bastante difícil sua observação, assim algumas das informações que temos sobre esse planeta são ainda incertas. Deve ser composto de rochas (70 %) e gelo de compostos orgânicos (30 %). Parece apresentar uma pequena atmosfera de Nitrogênio, monóxido de carbono e metano (CH_4).

FIGURA 3.14 – IMAGEM DE PLUTÃO E SEU COMPANHEIRO CARONTE OBTIDA COM O HUBBLE SPACE TELESCOPE (STScI).

Plutão possui um grande satélite, Caronte - nome do barqueiro, que na mitologia grega, atravessa o rio levando as almas para o Hades. Descoberto apenas em 1978, é um pequeno satélite, de composição e tamanho comparáveis ao de Plutão: o raio de Caronte é aproximadamente metade o de Plutão. Assim, pode-se considerar que ambos formam um sistema duplo de planetas. Recentemente, em 2005, foram descobertos mais dois pequenos satélites de Plutão: Hidra e Nix.

3.3.3.2. ÉRIS

Descoberto já no século XXI, Éris, com diâmetro de 3100 quilômetros, é maior que Plutão. É, assim, o maior dos planetas-anões. O ano em Éris dura em torno de 560 anos terrestres. Sua órbita, muito excêntrica, coloca-o a distâncias do Sol entre 38 e 98 Unidades Astronômicas.

FIGURA 3.15 – ÓRBITA DE ÉRIS (WIKIPEDIA: ÉRIS)

3.3.4. CORPOS MENORES DO SISTEMA SOLAR

Existem corpos que orbitam em torno do Sol, mas que não possuem forma esférica devido a sua própria gravidade. Eles são os chamados corpos menores do sistema solar. Eles incluem os asteróides, cometas e objetos transnetunianos. Graças ao avanço das técnicas de observação astronômica, tem-se descoberto um grande número de objetos desse tipo, que são intrinsicamente muito fracos e de difícil detecção. Isso é particularmente válido para os objetos que se encontram muito afastados do Sol (e portanto da Terra), em órbitas além da de Netuno. Vamos falar um pouco sobre esses discretos objetos abaixo.

3.3.4.1. ASTERÓIDES

Apesar do nome de origem grega que significa "similar a estrelas", os asteróides são mais parecidos aos planetas, apesar de muito menores. Concentram-se, em sua maioria, em um anel entre as órbitas de Marte e Júpiter: o cinturão de asteróides ou cinturão de asteróides principal. Imagine o que aconteceria se um planeta fosse quebrado em milhares de pedacinhos e esses pedacinhos fossem espalhados ao longo de sua órbita. O cinturão de asteróides é aproximadamente isso. Porém, os asteróides não devem ser o resultado de um processo destrutivo, mas, sim, um planeta que não deu certo. Como veremos mais adiante os planetas devem ter sido formados aos poucos, a

partir da aglutinação de pedaços menores. Existem asteróides também em outras regiões do sistema solar: um exemplo são os asteróides além da órbita de Netuno que compõem, com os plutóides, os objetos transnetunianos.

A região do sistema solar além da órbita de Netuno, que se encontra a aproximadamente a 30 unidades astronômicas do Sol, e que contém os objetos transnetunianos é normalmente dividida em Cinturão de Kuiper, Disco Disperso e Nuvem de Oort em ordem de distância ao Sol. Os dois primeiros encontram-se próximos ao plano e contém muitos asteróides. A Nuvem de Oort deve ser a origem de muitos cometas, sobre os quais discorremos na próxima seção.

O diâmetro dos asteróides pode chegar a centenas de quilômetros. O maior deles, Ceres, tem um diâmetro de aproximadament 970 quilômetros. Ele é também um planeta-anão e possue, portanto, forma esférica. Os grandes asteróides são esféricos, mas os menores podem possuir formas irregulares (como a de batatas). A maior parte deles são formados basicamente por rochas (silicatos). Porém, alguns podem ser metálicos (ferro).

3.3.4.2. Cometas

Entre os corpos menores do sistema solar, encontram-se também os cometas. Eles orbitam em torno do Sol. Porém, suas órbitas não se limitam à região próxima ao plano do sistema solar, como as dos planetas. As órbitas dos cometas possuem inclinações as mais variadas, com excentricidades bastante altas e raios muito grandes, podendo ser maiores que a dos objetos transnetunianos mais afastados. Assim, os objetos do sistema solar com as maiores órbitas encontram-se entre os cometas.

Ao contrário dos asteróides, os cometas são compostos basicamente por gelo. O núcleo de um cometa é um aglomerado de matéria sólida: grãos de poeira e gelo de materiais orgânicos. Quando um deles se aproxima do Sol, o material de sua superfície sublima, formando uma nuvem de gás e poeira ao seu redor. Essa é a chamada coma. O movimento do cometa, em combinação com a ação do vento solar, forma duas caudas: a de gás e a de poeira.

FIGURA 3.16 – IMAGENS DO COMETA HALE-BOPP OBTIDAS COM O HUBBLE SPACE TELESCOPE (STScI).

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

FIGURA 3.17 - UM EXEMPLO DE ÓRBITA DE COMETA.

3.3.5. METEOROS. METEORITOS E METEORÓIDES

Un fenômeno bastante conhecido e relacionado aos corpos menores do sistema solar é a "estrela cadente". Esse fenômeno não é de modo algum relacionado a

queda de uma estrela. O risco luminoso que por vezes vemos no céu origina-se sa entrada na atmosfera de restos de cometas e asteróides que vagam pelo sistema solar. Esses corpos são os chamados meteoróides. Os menores são desintegrados pelo atrito com a atmosfera e apenas os maiores podem chegar à superfície da Terra, quando são denominados meteoritos. Esses meteoritos são, em sua maior parte, originários de asteróides. Ao entrar na atmosfera é produzida luz, que é o que chamamos de meteoro.

Assim, o corpo que entra na atmosfera é o **meteoróide**. O **meteoro** é o fenômeno que ocorre quando o meteoróide entra na atmosfera terrestre. Um **meteorito** é um objeto sólido, o remanescente de um meteoróide, que atingiu a superfície terrestre. Nem todo meteoróide produz um meteorito.

Por que existem épocas do ano em que ocorrem as chuvas de meteoros? 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 3.18 – METEORITO DE UM FRAGMENTO DO ASTERÓIDE VESTA (NASA).

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

consequência, a dos animais que delas se alimentavam. A energia estimada para esse impacto corresponde a cinco bilhões de bombas nucleares como a que foi lançada em Hiroshima.

3.4. A FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

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

A galáxia em que vivemos chama-se Via Láctea. As estrelas que formam a Via Láctea formam a faixa esbranquiçada, de aparência leitosa, que pode ser vista em noites escuras de inverno. O Sol é apenas uma das bilhões de estrelas que existem na Via Láctea. O planeta mais distante encontra-se muito mais perto que a estrela mais próxima. Netuno encontra-se a poucas 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, existem nuvens de matéria na região equatorial. Essas nuvens não são como as da nossa atmosfera, que são basicamente compostas por água, mas aglomerados de gás e poeira. As estrelas, de modo geral, e o nosso sistema solar, em particular, tiveram sua origem em uma nuvem desse tipo. Isto é, o Sol nasceu e foi formado em uma dessas nuvens.

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

O modelo mais aceito atualmente para a formação do sistema solar considera que o sistema solar como um todo (Sol, planetas, etc.) surgiu a partir de uma mesma nuvem de gás e poeira: a Nebulosa Solar Primitiva. Em algum momento, essa nuvem começou a se contrair devido à autogravidade. O estopim de um processo desse tipo pode ter sido a explosão de uma estrela chamada supernova (leia sobre supernovas no

Capítulo 5 sobre estrelas). Essa explosão fez com que o equilíbrio gravitacional da nuvem acabasse, e assim começasse a sua contração. Poderíamos dizer que assim foi a concepção do sistema solar. O colapso gravitacional pode ter ocorrido naturalmente, também.

Assim, o sistema solar em seu início, há cerca de 4,6 bilhões de anos atrás, era muito diferente do que é hoje. 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, um disco externo estruturava-se em anéis. Eles iriam transformar-se nos planetas. Um dos anéis não deu origem a um planeta, mas continua até hoje como um anel. É o cinturão de asteróides, entre as órbitas de Marte e Júpiter, sobre o qual já falamos em uma seção anterior.

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.

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

A teoria de formação do sistema solar também nos fornece uma explicação para a existência de dois grupos de planetas. Os planetas formaram-se a partir da aglutinação de corpos menores. Nessa época, as temperaturas nas regiões próximas ao Sol, onde se formaram os planetas interiores, eram altas o suficiente para que os elementos mais leves não pudessem estar na forma sólida, e assim não poderiam se

aglutinar para formar corpos cada vez maiores. Isto é, apenas materiais pesados poderiam permanecer sólidos e formar os planetesimais. Já para distâncias maiores, mesmo os elementos leves poderiam estar sob forma sólida e, por serem mais abundantes, os planetas gigantes são formados basicamente por esses elementos.

É interessante notar que muito do que sabemos sobre a formação do sistema solar é corroborado pelo que observamos no Universo. Existem regiões onde ocorre atualmente a formação de estrelas, exatamente como aconteceu em nosso sistema solar. Faça uma analogia com os seres humanos. Em uma festa, um dos convivas é um jovem de 20 anos. Porém entre todos os convidados você pode encontrar bebês, crianças, adolescentes, adultos e idosos, todos ao mesmo tempo. E cada um deles representa uma fase passada ou futura daquele jovem de 20 anos. Assim, entendendo as pessoas dessa festa, você pode entender a evolução de um ser humano do nascimento à morte. Assim, também ocorre com as estrelas. No capítulo, a formação estelar é apresentada com mais detalhes.

FIGURA 3.19 - UM DISCO PLANETÁRIO OBSERVADO NA REGIÃO DE ÓRION PELO HUBBLE SPACE TELESCOPE (STScI).

3.5. EXISTEM OUTROS SISTEMAS PLANETÁRIOS NO UNIVERSO?

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

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

3.6. BIBLIOGRAFIA

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

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

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

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

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

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

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

Capítulo 4

O SOL

José Roberto Cecatto*

*Revisado em Maio de 2018

* e-mail: jr.cecatto@inpe.br

O SOL

4-1 INTRODUÇÃO....4-11

4-2 NASCIMENTO DO SOL....4-12

4-3 ESTRUTURA DO SOL....4-13

4-3-1 INTERIOR E ENERGIA SOLAR....4-14

4-3-1-1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA NO NÚCLEO DO SOL....4-16

4-3-1-2 TACOCLINA....4-17

4-3-1-3 PROBLEMA DOS NEUTRINOS SOLARES – SOLUÇÃO E OUTROS PROBLEMAS....4-18

4-3-2 A ATMOSFERA SOLAR....4-20

4-3-2-1 FOTOSFERA....4-20

4-3-2-2 CROMOSFERA....4-23

4-3-2-3 REGIÃO DE TRANSIÇÃO CROMOSFERA-COROA....4-26

4-3-2-4 COROA....4-27

4-4 CAMPOS MAGNÉTICOS SOLARES E SUA ORIGEM....4-28

4-5 REGIÕES ATIVAS....4-31

4-6 CICLO DE ATIVIDADE....4-32

4-7 EXPLOSÕES ("FLARES") SOLARES....4-35

4-8 EJEÇÕES DE MASSA CORONAL....4-37

4-9 RELAÇÕES SOLARES-TERRESTRES....4-39

4-9-1 EFEITOS DO CLIMA ESPACIAL NO AMBIENTE TERRESTRE.....4-40

4-10 VENTO SOLAR.....4-41

4-11 ESPECTRO SOLAR.....4-44

4-12 INTERIOR SOLAR E HELIOSISMOLOGIA.....4-46

4-13 EMISSÃO SOLAR NA BANDA DE ONDAS DE RÁDIO.....4-48

4-13-1 O SOL CALMO.....4-50

4-13-2 A COMPONENTE DE VARIAÇÃO LENTA.....4-51

4-13-3 A COMPONENTE DE VARIAÇÃO RÁPIDA OU COMPONENTE EXPLOSIVA.....4-53

4-13-4 FULGURAÇÕES SOLARES E FENÔMENOS ASSOCIADOS EM ALGUNS COMPRIMENTOS DE ONDA.....4-54

4-14 IMPORTÂNCIA DAS PESQUISAS CIENTÍFICAS SOBRE O SOL.....4-58

REFERÊNCIAS.....4-59

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 4.1- CONCEPÇÃO ARTÍSTICA MOSTRANDO A FORMAÇÃO DO SOL E SISTEMA SOLAR....4-13

FIGURA 4.2- ESQUEMA REPRESENTANDO AS CAMADAS INTERNAS DO SOL: NÚCLEO, ZONA RADIATIVA E ZONA CONVECTIVA....4-15

FIGURA 4.3- IMAGENS MOSTRANDO O FENÔMENO DE GRANULAÇÃO DA FOTOSFERA SOLAR....4-16

FIGURA 4.4- SEQÜÊNCIA DE REAÇÕES DA CADEIA PPI RESPONSÁVEL PELA PRODUÇÃO DE ENERGIA NO NÚCLEO DO SOL....4-17

FIGURA 4.5- PERFIL DA ROTAÇÃO INTERIOR DO SOL EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA AO CENTRO....4-19

FIGURA 4.6- DISCO SOLAR COM MANCHAS SOLARES....4-21

FIGURA 4.7- EXEMPLO DE GRUPO DE MANCHAS SOLARES....4-22

FIGURA 4.8- IMAGEM DE UMA MANCHA SOLAR ISOLADA....4-22

FIGURA 4.9- IMAGEM DO SOL EM LUZ BRANCA....4-23

FIGURA 4.10- IMAGEM DO SOL EM H-ALFA....4-24

FIGURA 4.11- PROEMINÊNCIA SOLAR OBSERVADA EM H-ALFA....4-25

FIGURA 4.12- IMAGEM EM RAIOS-X DO SOL, OBTIDA PELO SATÉLITE SKYLAB EM 19 DE DEZEMBRO DE 1973....4-25

FIGURA 4.13- EXEMPLOS DE ECLIPSES SOLARES TOTAIS MOSTRANDO A COROA....4-28

FIGURA 4.14 - EVOLUÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO SOLAR DURANTE O INÍCIO DE UM CICLO DE ATIVIDADE....4-29

FIGURA 4.15 – PROPRIEDADE DE FLUTUAÇÃO DE UM TUBO DE FLUXO MAGNÉTICO NO ENVELOPE CONVECTIVO DO INTERIOR SOLAR....4-29

FIGURA 4.16- POLARIDADES DAS MANCHAS "PRECURSORA" E "SEGUIDORA" DO CAMPO MAGNÉTICO DE REGIÕES ATIVAS NOS HEMISFÉRIOS NORTE E SUL DO SOL DURANTE DOIS CICLOS DE ATIVIDADE SOLAR.....4-30

FIGURA 4.17- CONFIGURAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO DE UMA REGIÃO ATIVA SOLAR EM ESTÁGIO EVOLUÍDO.....4-31

FIGURA 4.18- PARÂMETRO BETA DE PLASMA PARA AS VÁRIAS CAMADAS DA ATMOSFERA SOLAR.....4-33

FIGURA 4.19- EVOLUÇÃO DOS CICLOS SOLARES DESDE 1600.....4-34

FIGURA 4.20- "DIAGRAMA BORBOLETA" MOSTRANDO AS LATITUDES DE SURGIMENTO DAS MANCHAS SOLARES AO LONGO DE NOVE CICLOS SOLARES CONSECUTIVOS.....4-34

FIGURA 4.21- EXEMPLO DE "FLARE" SOLAR OBSERVADO EM H-ALFA.....4-36

FIGURA 4.22- SEQÜÊNCIA DE IMAGENS MOSTRANDO A OCORRÊNCIA DE UMA CME.....4-38

FIGURA 4.23- ILUSTRAÇÃO DAS DIMENSÕES DE UMA CME EM COMPARAÇÃO COM A TERRA.....4-39

FIGURA 4.24 – VENTO SOLAR E SUA INTERAÇÃO COM A MAGNETOSFERA TERRESTRE.....4-42

FIGURA 4.25- EXEMPLOS DE FOTOS DE AURORAS OBTIDAS EM ALTAS LATITUDES DURANTE O PERÍODO DE MÁXIMO DO CICLO SOLAR 23.....4-43

FIGURA 4.26- ESPECTRO SOLAR NA BANDA DE COMPRIMENTOS DE ONDA DA LUZ VISÍVEL.....4-45

FIGURA 4.27- MODELO SOLAR MOSTRANDO, DE CIMA PARA BAIXO, OS PERFÍS ESTIMADOS DE TEMPERATURA, PRESSÃO E DENSIDADE COM A PROFUNDIDADE NO INTERIOR SOLAR DESDE O CENTRO ATÉ A "SUPERFÍCIE".....4-47

FIGURA 4.28- ESPECTRO SOLAR, DO ULTRAVIOLETA AOS COMPRIMENTOS DE ONDA DE RÁDIO.....4-49

FIGURA 4.29- DISTRIBUIÇÃO DE BRILHO SOLAR EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA AO CENTRO DO DISCO, EM RAIOS SOLARES, MEDIDA EM CINCO COMPRIMENTOS DE ONDA DE RÁDIO DISTINTOS ENTRE 1 CM E 5 M.....4-51

FIGURA 4.30- REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS DIFERENTES FASES DE UMA FULGURAÇÃO SOLAR TÍPICA COMO OBSERVADA EM RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA E PARTÍCULAS EMITIDAS.....4-55

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 - CARACTERÍSTICAS DO SOL.....4-12

TABELA 4.2 - LINHAS ESPECTRAIS DE ÍONS DE ELEMENTOS NO ESPECTRO SOLAR DO ULTRAVIOLETA E ULTRAVIOLETA EXTREMO.....4-45

4.1 INTRODUÇÃO

Para os humanos, a Terra e o Sol, não necessariamente nesta ordem, são os astros mais importantes do sistema solar. A primeira por se tratar de nossa "casa", e o segundo por manter a Terra um planeta ideal para a existência da vida, nas diversas formas que conhecemos. Isto ocorre porque a Terra encontra-se na zona habitável do nosso sistema solar. Desde os primórdios da civilização, o homem aprendeu a admirar o Sol como o responsável pela manutenção da vida na Terra e por isso mesmo, na maioria das culturas antigas, o Sol era adorado como um Deus - Helios pelos gregos, Mitras pelos persas e Rá pelos egípcios. Além disso, conhecemos o Sol, desde a infância, como fonte de energia e da luz que nos permite as primeiras percepções visuais a respeito do mundo que nos cerca. Com o passar dos anos aprendemos a tirar proveito de sua luz e calor intensos e a admirar sua imponência no céu diurno, como fazemos com a Lua e as estrelas no céu noturno.

Entretanto, não deixamos de nos perguntar como surgiu e de onde vem toda sua energia - luz e calor - que somos capazes de ver e sentir, e que o caracteriza como uma estrela que é a mais próxima da Terra. Por estar relativamente próximo da Terra, há milhares de anos o homem já identificava as principais características do Sol, como por exemplo, as manchas solares escuras e as regiões mais brilhantes na superfície, além da rotação do disco solar. Mais recentemente, com o advento de técnicas poderosas e avançadas, temos nos aproximado de desvendar alguns de seus mistérios.

O Sol está no centro geométrico e gravitacional do sistema solar, a uma distância média aproximada de 150 milhões de quilômetros da Terra - distância que a luz percorre em 8 minutos e 19 segundos. Em torno dele orbitam todos os outros corpos do sistema solar, como planetas, asteróides e cometas. A Tabela 1.1 mostra várias das principais características físicas do Sol, como por exemplo: massa, raio, luminosidade, temperatura superficial.

TABELA 4.1 - CARACTERÍSTICAS DO SOL

Massa	$1{,}989 \times 10^{30}$ kg
Raio Equatorial	695.500 km
Raio Médio	109 raios terrestres
Densidade Média	1410 kg/m^3
Densidade Central	160000 kg/m^3
Período de Rotação Equatorial*	26,8 dias
Velocidade de Escape na "Superfície"	617,7 km/s
Distância Média à Terra	149,6 milhões de km
Luminosidade	$3{,}86 \times 10^{26}$ W
Temperatura Média na Superfície	5780 K
Idade	$4{,}6 \times 10^9$ anos
Tipo espectral	G2V
Magnitude visual	-26,74
Magnitude absoluta	+4,83 (5ª. magnitude)
Distância ao centro galático	~ 30000 anos-luz
Velocidade orbital	250 km/s
Período orbital	250×10^6 anos
Aceleração gravitacional ("superfície")	274 m/s^2

* O Sol apresenta rotação diferencial, isto é, o período de rotação depende da latitude. Nas regiões polares, a rotação dura cerca de 32 dias.

4.2 NASCIMENTO DO SOL

De forma bem simplificada, podemos explicar o nascimento do Sol como segue – para maiores detalhes consultar o capítulo referente a formação de estrelas. As estrelas nascem em regiões do Universo onde existem nuvens densas de gás (predominantemente Hidrogênio) e poeira gigantescas, cuja massa é maior que a chamada massa de Jeans, dentro das quais ocorre contração gravitacional que forma uma estrela ou estrelas no seu interior. Numa região interna à nuvem, onde ocorre a contração, a matéria aglutinada gradativamente vai aumentando a atração gravitacional conforme a massa colapsada vai crescendo e se concentrando. Além disso, no centro da concentração de matéria crescem gradativamente a pressão e temperatura do gás, de acordo com o aumento da matéria colapsante, até o ponto onde pressão e temperatura estão altos o suficiente para gerar a fusão de núcleos de Hidrogênio em seus isótopos – Deutério e Trítio – e também em núcleos de Hélio.

Considera-se o nascimento de uma estrela o momento em que tanto a taxa de fusão de núcleos leves naqueles mais pesados se estabiliza – entrada na seqüência principal – quanto a massa colapsante atinge o equilíbrio hidrostático.

Em torno das estrelas, eventualmente forma-se um disco girante, devido à conservação do momento angular, onde ocorrem aglutinações da matéria em órbitas específicas. Em cada uma destas órbitas, a matéria quando condensada num único corpo gera um planeta. Desta mesma forma, estima-se que o Sol e o sistema solar tenham sido formados há 4,6 bilhões de anos. A Figura 4.1 ilustra a idéia da formação do Sol e do sistema solar. Esta é uma versão muito simplificada – detalhes no capítulo de sistema solar.

FIGURA 4.1 - CONCEPÇÃO ARTÍSTICA MOSTRANDO A FORMAÇÃO DO SOL E SISTEMA SOLAR. A REGIÃO MAIS CLARA CORRESPONDE À ESTRELA EM TORNO DA QUAL ESTÃO ORBITANDO ALGUNS PLANETAS DO SISTEMA SOLAR EM FORMAÇÃO. (FONTE: LANG, 2001).

4.3 ESTRUTURA DO SOL

O Sol pode ser dividido em interior solar e atmosfera solar. Nem todas as estrelas têem a mesma estrutura interna. Esta varia de estrela para estrela, dependendo fundamentalmente de sua quantidade de massa. Grosseiramente, podemos dividir as

estrelas em dois grandes grupos: estrelas de baixa massa – de poucas vezes maior a frações da massa solar – e as demais como estrelas de grande massa. As estrelas de baixa massa como o Sol, diferentemente daquelas muito massivas, geralmente apresentam um núcleo radiativo e um envelope convectivo. Isto devido à elevada opacidade de sua camada externa e, principalmente à temperatura relativamente alta de seu núcleo central, embora uma a duas ordens de grandeza mais baixa do que de estrelas massivas.

Por sua vez, a parte mais externa da estrutura solar conhecida por atmosfera é composta de 3 camadas: fotosfera, cromosfera e coroa, além da região de transição cromosfera-coroa.

4.3.1 INTERIOR E ENERGIA SOLAR

A estrutura interna do Sol é composta de um núcleo, uma zona radiativa acima deste e um envelope convectivo que cobre a camada radiativa e se estende até a "superfície". Além disso, existe uma estreita camada de transição entre a zona radiativa e o envelope convectivo designada por tacoclina. A Figura 4.2, mostra um esquema das camadas do interior solar. Ressalte-se que a camada limite na figura é a chamada tacoclina.

O Sol emite uma potência aproximada de $3{,}86 \times 10^{26}$ W. Toda essa energia se origina de reações de fusão termonuclear de núcleos leves – principalmente Hidrogênio e seus isótopos – em elementos mais pesados, ocorrendo continuamente no núcleo central do Sol. Estima-se que essa energia produzida no núcleo solar leva cerca de 10.000 anos para ser transportada, inicialmente pela zona radiativa e, em seguida, pelo envelope convectivo, até atingir a "superfície" e ser liberada na forma de radiação de "corpo negro" com a temperatura efetiva de 5.780 K.

O estudo científico das condições físicas no interior e na atmosfera das estrelas nos permitiram determinar seus processos de produção de energia. Sabemos que as estrelas são gigantescas massas de gás (predominantemente hidrogênio) que se mantém coesas pela própria força gravitacional. Por este motivo, tanto a pressão quanto a temperatura do gás são altíssimas no núcleo das estrelas. Por exemplo, a temperatura é da ordem de milhões a centenas de milhões de graus (cerca de 15 milhões de graus no caso do Sol). Nestas condições de temperatura e pressão, o gás encontra-se no estado ionizado -

plasma – onde ocorrem as reações de fusão de núcleos dos elementos leves dando origem aos elementos mais pesados. Detalhes são fornecidos na próxima sub-seção.

Devido à alta pressão no centro, o gás apresenta propriedades que podem ser melhor descritas no estado de fluido ao invés do estado gasoso. Da energia produzida pela fusão dos elementos no núcleo das estrelas - em especial, o Sol - parte é usada para manter as condições de temperatura e pressão internas, e parte é emitida na forma de radiação que escapa pela "superfície" iluminando e aquecendo os astros do espaço interplanetário.

FIGURA 4.2 - ESQUEMA REPRESENTANDO AS CAMADAS INTERNAS DO SOL: NÚCLEO, ZONA RADIATIVA E ZONA CONVECTIVA. O NÚCLEO DO SOL ENCONTRA-SE EM EQUILÍBRIO COM A CAMADA RADIATIVA, COBERTA POR UMA CAMADA ONDE OCORRE CONVECÇÃO (FONTE: http://science.msfc.nasa.gov/ssl)

Observando-se a "superfície" solar, com grande aumento, pode-se ver grãos, semelhantes a bolhas de água em ebulição no interior de uma panela (Figura 4.3).

No caso do Sol, são bolhas de gás muito quente transportando a energia do interior para a "superfície" por convecção do gás. No envoltório abaixo da "superfície", a convecção ocorre se for atendido o critério de Schwarzschild – $|(\text{grad } T)_{adi}| < |(\text{grad } T)_{rad}|$. Portanto, a convecção ocorre devido a grande opacidade dessa camada à transferência de energia

pelo processo radiativo. Assim, 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, tornando a descer. As células de convecção têem cerca de 5.000 km e se movimentam em escalas de 10 minutos.

FIGURA 4.3 - IMAGENS MOSTRANDO O FENÔMENO DE GRANULAÇÃO DA FOTOSFERA SOLAR. (FONTE: HTTP://ASTRO.IF.UFRGS.BR/ESOL/ESOL.HTML)

4.3.1.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA NO NÚCLEO DO SOL

O processo responsável pela produção de energia nas estrelas é a fusão nuclear de elementos leves – principalmente Hidrogênio (H) e seus isótopos (Deutério e Trítio) – em Hélio (He^4) e outros elementos mais pesados. A seqüência mais importante de reações nucleares que ocorrem em estrelas da seqüência principal é aquela que converte núcleos de H em núcleos de He^4. Isto ocorre por vários caminhos. Contudo, algumas reações são excluídas pelas leis de conservação: de carga, número de bárions (prótons e nêutrons) e energia. No caso específico do Sol, a reação dominante é a cadeia ppI descrita a seguir. Inicialmente, temos 2 pares de núcleos de H, onde os 2 núcleos de cada par se fundem originando 2 núcleos de Deutério (D), liberando 2 pósitrons e 2 neutrinos. Em seguida, cada núcleo de D se funde com outro núcleo de H, originando 2 núcleos de He^3 e 2 raios-gama. Finalmente, os 2 núcleos de He^3 assim formados se fundem originando um núcleo de He^4 e mais 2 núcleos de H. Na prática, os raios-gama produzidos nesta cadeia em grande parte são os responsáveis pela radiação eletromagnética observada do Sol. A Figura 4.4 mostra esta seqüência de reações da cadeia ppI que produzem a maior parte da energia no interior do Sol.

Uma outra pequena fração da energia solar é produzida pela cadeia ppII. Nesta outra cadeia, a partir da formação de um núcleo de He^3, este se funde com um núcleo de He^4 formando um núcleo de Be^7 e um raio-gama. O Be^7 decai para um núcleo de Li^7 com a emissão de um elétron e um neutrino. Por fim, este núcleo de Li^7 formado se funde com um núcleo de H, produzindo 2 núcleos de He^4. Estima-se que apenas cerca de 15% de toda a energia do Sol é produzida por este outro processo.

FIGURA 4.4 – SEQÜÊNCIA DE REAÇÕES DA CADEIA PPI RESPONSÁVEL PELA PRODUÇÃO DE ENERGIA NO NÚCLEO DO SOL. (FONTE: GREEN E JONES, 2004).

4.3.1.2 TACOCLINA

O termo relativamente recente tacoclina, se refere à estreita camada de transição entre a zona radiativa do interior solar e o envelope convectivo que se estende até a "superfície". O termo, originalmente proposto em 1992 por Spiegel & Zahn, deriva de duas palavras: *tachus* de origem grega, que significa rápido (velocidade) e *clinare* de origem latina, cujo significado é reclinar-se (variação). No caso, trata-se de uma estreita (~ 0,04 R_S) camada do interior solar que acopla a rotação uniforme - na forma de corpo rígido - do núcleo radiativo com a rotação diferencial em função da latitude do envelope convectivo. Essa diferença cria o efeito observacional de uma velocidade de rotação maior nas regiões equatoriais com um gradual aumento do período de rotação sendo observado em direção às regiões polares. Devido a essa característica, a tacoclina apresenta um alto grau de cisalhamento. Como mencionado o núcleo radiativo apresenta

rotação uniforme, porém sua velocidade de rotação equivale àquela observada na regiões fotosféricas de moderadas latitudes (35 a 40 graus).

Para se ter uma idéia, nas proximidades do equador o Sol completa uma rotação em cerca de 26 dias enquanto que em regiões de 80 graus de latitude o período passa para pouco mais de 31 dias. Isso significa que 5 rotações de regiões polares do Sol equivalem aproximadamente a 6 de suas rotações equatoriais. Acredita-se que tanto a geometria quanto a espessura desta camada têem importância fundamental em modelos de dínamo solar, suprimindo o campo poloidal mais fraco – dominante nos períodos de mínimo do ciclo de atividade - e criando o campo toroidal bem mais intenso – característico de épocas de atividade do ciclo.

Observações heliosismológicas indicam que a tacoclina deve ter uma espessura de cerca de 4% do raio solar e que se encontra localizada a cerca de 70% do raio solar quando medido a partir do centro em direção à "superfície". A Figura 4.5, obtida de observações heliosismológicas, apresenta o período de rotação observado no Sol a partir de meio raio solar até a superfície. Pode-se ver claramente que o núcleo radiativo gira com velocidade uniforme e que existe uma região de transição a partir da qual a velocidade angular passa a apresentar valores distintos em função da latitude.

4.3.1.3 PROBLEMA DOS NEUTRINOS SOLARES – SOLUÇÃO E OUTROS PROBLEMAS

A estrutura interna das estrelas tem sido bem estimada, porém pouco conhecida na realidade. Acredita-se que a estrutura interna de uma estrela esteja definida a partir de sua massa e composição química. Mas, a composição química muda gradualmente à medida que o H é convertido em He^4 e não é sempre conhecida. Além disso, não é sabido se o He^4 produzido no centro lá permanece ou é levado para as camadas mais externas por algum processo de mistura. Também tem sido sugerido que o Sol e outras estrelas ainda possuem os núcleos da época de sua formação que giram relativamente rápido. Finalmente, a estrutura das camadas mais externas do Sol é modificada pela existência de convecção, que temos dificuldade em modelar.

FIGURA 4.5 – PERFIL DA ROTAÇÃO INTERIOR DO SOL EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA AO CENTRO, A PARTIR DE 0.5 R_S ATÉ A "SUPERFÍCIE", EXIBINDO A VARIAÇÃO DA FREQÜÊNCIA DE ROTAÇÃO COM A LATITUDE SOLAR (FONTE: NATIONAL SOLAR OBSERVATORY - NSO)

Por estas razões tem sido renovado o interesse no interior solar, particularmente porque atualmente se pode sondá-lo, até um determinado ponto, através de observações dos neutrinos e heliosismologia. Visto que o Sol é a única estrela para a qual tais observações são possíveis, estas investigações são de grande importância para a compreensão de todas as outras estrelas.

Para a produção de energia no centro do Sol já vimos que ocorre a fusão dos núcleos de átomos leves para formação de núcleos de átomos mais pesados. Entretanto, a taxa de neutrinos solares produzidos, medida por experimentos científicos, é cerca de 3 vezes menor do que aquela prevista pelos cálculos teóricos. Este fato ficou conhecido como o "Problema dos neutrinos solares" e intrigou a comunidade de físicos e astrônomos até o início deste século, gerando várias explicações sem uma base consistente.

Entretanto, já na última década do século XX, havia uma hipótese, proposta por Wolfenstein, de que uma boa fração dos neutrinos solares, produzidos no núcleo do Sol, sofriam oscilação de massa se transformando em outro tipo de neutrino que não podia ser detectado pelos experimentos disponíveis na época. Esta hipótese foi confirmada, no início do século XXI, por medidas efetuadas tanto com o detector japonês chamado de SuperKamiokande quanto com o detector canadense chamado Sudbury Neutrino Observatory (SNO), e com isto foi solucionado o problema dos neutrinos solares. Entretanto, outras questões surgiram com esta descoberta, entre elas a determinação de qual a porcentagem de produção de energia no centro do Sol devido à cadeia PP e aquela devido ao ciclo CNO.

4-3-2 A ATMOSFERA SOLAR

Como já foi citado, a atmosfera solar é composta basicamente por 3 camadas: fotosfera - visível a olho nu, cromosfera, acima da primeira, e coroa solar, a camada mais externa e tênue. Além disso, existe a chamada região de transição entre a cromosfera e a coroa.

4-3-2-1 FOTOSFERA

Trata-se da camada visível do Sol. É uma estreita camada de cerca de 500 km de espessura, o que equivale a cerca de meio milésimo do raio solar. É da fotosfera que vem a maior parte da luz visível, por três razões. Primeiro, tanto cromosfera quanto coroa que estão acima são praticamente transparentes na luz visível. O gás desta camada não é totalmente transparente, e devido a sua opacidade o interior solar não pode ser visto. E por último, sua extensão e temperatura são de tal magnitude que a tornam uma potente fonte térmica de radiação.

A densidade desta camada é de cerca de 10^{13}-10^{15} partículas por centímetro cúbico. Além da granulação, nesta camada podem ser observadas manchas escuras que surgem e praticamente desaparecem por completo regularmente em períodos com média de cerca de 11 anos. A Figura 4.6 mostra um exemplo de grupos de manchas observadas sobre o disco solar, característico de épocas de máximo do ciclo de atividade.

FIGURA 4.6 - DISCO SOLAR COM MANCHAS SOLARES. (FONTE: http://www.spaceweather.com)

Essas manchas já eram observadas pelos chineses milhares de anos antes de Cristo e ficaram conhecidas como manchas solares. Entretanto, o estudo mais sistemático e científico das manchas solares só começou com o uso do telescópio, sendo observadas (por projeção da imagem do Sol) desde Galileo, já em 1610. Como ficará claro mais tarde, estão relacionadas com o ciclo de atividade solar.

As manchas solares tendem a se formar em grupos (Figura 4.7). Se constituem de duas partes: a umbra, parte central mais escura, com temperaturas em torno de 4000 K, e a penumbra, região um pouco mais clara e com estrutura radial em torno da umbra. A Figura 4.8 mostra um mancha solar isolada onde pode-se identificar a umbra e a penumbra.

A presença de manchas solares nos informa a respeito da existência de campos magnéticos intensos na atmosfera 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 emitindo bem menos radiação do que o restante da superfície solar. Por este motivo, devido ao contraste com a superfície solar mais brilhante é que as manchas aparecem escuras. Na realidade, as manchas típicas são aproximadamente 10 vezes mais brilhantes do que a Lua cheia, e normalmente, aparecem na superfície solar em grupos que evoluem em número e área total e podem durar até várias rotações solares.

FIGURA 4.7 - EXEMPLO DE GRUPO DE MANCHAS SOLARES. (FONTE: HTTP://SCIENCE.MSFC.NASA.GOV/SSL)

FIGURA 4.8 - IMAGEM DE UMA MANCHA SOLAR ISOLADA. PODEM SER CLARAMENTE IDENTIFICADAS A UMBRA E A PENUMBRA. (FONTE: HTTP://WWW.HAO.UCAR.EDU:80/PUBLIC)

O número de manchas presentes no disco solar está diretamente relacionado ao nível de atividade do ciclo que é explicado adiante. Observando-se um determinado grupo de manchas ao longo de vários dias constata-se que o Sol possui rotação, com um período médio de 28 dias (possui rotação diferencial de aproximadamente 27 dias no Equador e cerca de 32 dias nas proximidades dos pólos). O escurecimento - opacidade - observado do limbo é uma informação de que a temperatura cai com a altura na fotosfera (Figura

4.9). Esta camada apresenta uma temperatura que vai de ~ 5780 K na sua base até cerca de 4200-4400 K na sua parte mais elevada, próximo à base da cromosfera. O gás mais frio é menos brilhante, portanto a alta fotosfera é menos brilhante e mais opaca do que sua base e o efeito observado é o obscurecimento do limbo solar fotosférico.

FIGURA 4.9 - IMAGEM DO SOL EM LUZ BRANCA. PODE-SE OBSERVAR O OBSCURECIMENTO DO LIMBO, OU BORDA DO SOL. (FONTE: HTTP://WWW.HAO.UCAR.EDU:80/PUBLIC)

4-3-2-2 CROMOSFERA

Estendendo-se até cerca de 10.000 km acima da fotosfera esta camada possui uma temperatura que vai até dezenas de milhares de graus. A densidade cai de 2-3 ordens de grandeza relativamente à fotosfera. Esta camada pode ser vista observando-se o Sol com um filtro especial na luz vermelha, conhecido como H-α (correspondendo a primeira linha da série de Balmer do átomo de Hidrogênio em 6563 Å) (Figura 4.10). Utilizando este filtro pode-se distinguir as várias estruturas cromosféricas: proeminências, "praias" brilhantes, filamentos, fáculas, "plages" e espículos.

FIGURA 4.10 - IMAGEM DO SOL EM H-ALFA. PODE-SE IDENTIFICAR ESTRUTURAS COMO: FILAMENTOS - ESCUROS, FÁCULAS - CLARAS - E ESPÍCULOS - NO LIMBO. (FONTE: http://www.hao.ucar.edu:80/public)

Com um filtro H-α pode-se identificar a cromosfera e distinguir as proeminências, que são estruturas que se erguem do limbo ou formam nuvens escuras sobre o disco. "Praias" brilhantes podem ser vistas sobre o disco associadas às manchas.

Qualquer nuvem de material visível acima da fotosfera, observada no H-α, pode ser chamada de proeminência. Quando observada no limbo aparece brilhante em contraste ao céu escuro, quando observada no disco é chamada por filamento escuro, apresentando-se assim por possuir apenas 10% do brilho do disco solar em H-α. As proeminências podem ser observadas, em alguns pontos ao redor do disco escuro da Lua, quando ocorre o máximo de eclipses solares totais. E podem ser classificadas pela forma como se apresentam em:

1- Calmas (de longa duração): proeminências ou filamentos localizados em ou próximos a regiões ativas.

2- Ativas (transitórias): proeminências geralmente associadas a "flare" no limbo ou precipitação de arcos magnéticos.

A proeminência eruptiva está entre os mais espetaculares eventos solares (Figuras 4.11 e 4.12), e é responsável por uma grande parcela das ejeções de massa coronal - CME.

FIGURA 4.11 - PROEMINÊNCIA SOLAR OBSERVADA EM H-ALFA. (FONTE: http://science.msfc.nasa.gov/ssl)

FIGURA 4.12 - IMAGEM EM RAIOS-X DO SOL, OBTIDA PELO SATÉLITE SKYLAB EM 19 DE DEZEMBRO DE 1973. É MOSTRADA UMA DAS MAIS IMPRESSIONANTES PROEMINÊNCIAS JÁ REGISTRADAS. (FONTE: LABORATORIO ESPACIAL SKYLAB - NASA).

Uma boa fração dos "flares" estão associados a filamentos, que normalmente desaparecem por erupção para cima. Os filamentos grandes se formam gradualmente. O primeiro passo ocorre quando uma região ativa se rompe em duas regiões unipolares. A seguir, as linhas neutras que se formam do rompimento desta e outras regiões ativas se unem para produzir um filamento extenso. Às vezes duram por várias rotações solares.

Um filamento típico é menor, dura apenas uma rotação solar e sofre ligeira alteração de forma quase todo dia. Além disso, pode ser usado para estimativas da rotação solar.
Espículos são pequenos jatos de matéria que se projetam em direção à coroa solar, com velocidades de cerca de 20 km/s a alturas de até 15.000 km. Estas estruturas, que surgem em aglomerados semelhantes a placas de grama, só podem ser vistas quando se observa a atmosfera solar - com um filtro H-α - em direção ao limbo (contorno) do disco solar. Esses aglomerados normalmente aparecem na borda de estruturas magnéticas, têm uma largura de aproximadamente 2.000 km e duração de cerca de 10 minutos, quando surgem novos conjuntos de espículos.

4-3-2-3 REGIÃO DE TRANSIÇÃO CROMOSFERA-COROA

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 cerca de 1-2 milhões de graus, já na base da coroa. Além disso, a densidade decresce por mais 3-4 ordens de grandeza dos valores cromosféricos, valores estes típicos da coroa solar calma (característica de períodos de baixa atividade solar).

A primeira suposição da existência desta camada da atmosfera solar foi obtida a partir das medidas de temperatura e densidade tanto da cromosfera quanto da coroa solar. Como os valores obtidos nas duas camadas variavam de ordens de grandeza, se suspeitou que houvesse alguma camada intermediária que conectasse cromosfera à coroa de alguma forma, fazendo o elo e a transição contínua mesmo que relativamente abrupta destes parâmetros na atmosfera solar. O quadro que se formou na época foi de uma estreita camada uniforme e estática que fizesse a transição entre os valores de temperatura e densidade observados na cromosfera para aqueles característicos da coroa. Por este motivo, foi proposta e aceita a designação de região de transição.

Com o advento de observações solares através de instrumentos à bordo de satélites artificiais, nas décadas de 80 e 90 do século XX, o quadro acima começou a se modificar. Tratava-se de uma camada estreita – poucas centenas de km - e bem irregular da atmosfera solar separando a coroa quente da cromosfera bem mais fria. Verificou-se que o calor desce da coroa para a cromosfera e no processo produz esta estreita região onde a temperatura muda rapidamente de 1 milhão na base da coroa para dezenas a centenas de milhares de graus. Àquela alta temperatura o Hidrogênio se encontra

ionizado (desprovido de seus elétrons) o que dificulta a sua visão. Em vez do Hidrogênio, a luz emitida pela região de transição é dominada por íons tais como o C IV, o O IV, e o Si IV (cada um desprovido de 3 de seus elétrons). Estes íons emitem luz, na faixa do ultravioleta do espectro solar, que é absorvida pela atmosfera terrestre e pode ser observada apenas do espaço por meio de instrumentos a bordo de satélites.

Além disso, evidências observacionais mais recentes indicam que a região de transição é bem definida e localizada espacialmente, e composta de um plasma dinâmico e detalhadamente estruturado confinado no interior de cordões de um campo magnético filamentar. O plasma se move em altas velocidades e ocorrem rápidas variações temporais de todos os parâmetros do gás. A massa do plasma é pequena e como conseqüência facilmente perturbada. Neste caso, marcas espectrais de processos de transferência de momento e energia na atmosfera solar são facilmente detectáveis na região de transição, onde podem ser amplificados em comparação às respostas obtidas nas mais extensas e complexas camadas da cromosfera e coroa. Desta forma, a região de transição permite que se observe fenômenos que estão ocorrendo em regiões onde as temperaturas são mais baixas e também onde são mais altas na atmosfera solar.

4-3-2-4 COROA

A coroa é a parte mais externa da atmosfera solar e estende-se por milhões de quilômetros a partir do Sol. É melhor observada durante os eclipses totais do Sol, pois apesar de ter um brilho equivalente ao da Lua cheia, ela fica obscurecida quando a fotosfera é visível. Desta forma, durante o eclipse, como o disco solar é ocultado pela Lua, é possível observar e estudar a coroa (Figura 4.13).

Como já mencionado, a densidade desta camada é de 3-4 ordens de grandeza mais baixa do que aquela da cromosfera e sua temperatura é de 1-2 milhões de graus. Como a temperatura é extremamente alta, a coroa emite grande quantidade de raios-X. Além disso, a esta temperatura o gás encontra-se na forma de plasma - gás ionizado - produzindo assim os elétrons e íons que podem formar o chamado vento solar. Este vento se propaga por todo o sistema solar e eventualmente atinge a Terra.

FIGURA 4.13 - EXEMPLOS DE ECLIPSES SOLARES TOTAIS MOSTRANDO A COROA (FONTE: HTTP://SUNEARTH.GSFC.NASA.GOV/ECLIPSE/ECLIPSE.HTML)

Nesta camada também são observadas as chamadas regiões ativas, locais onde temperatura e densidade são elevadas além de possuírem campos magnéticos intensos (de dezenas a centenas de Gauss) distribuídos em forma de arcos com as extremidades - pólos magnéticos - situados na fotosfera.

É nas regiões ativas que se observam os fenômenos conhecidos como explosões ("flares") solares – vide adiante - que ocorrem com freqüência muito maior nos períodos de máximo de atividade do ciclo solar (explicado adiante).

4.4 CAMPOS MAGNÉTICOS SOLARES E SUA ORIGEM

Acredita-se que o campo magnético solar seja formado pelo mecanismo de dínamo por transporte de fluxo (Choudhuri, 2007). O processo como um todo está descrito a seguir.

Como mencionado, o Sol possui rotação diferencial, mais rápida nas baixas latitudes do que nos pólos. Assim, o gás que está preso às linhas de campo as arrasta consigo causando distorção em sua direção, de médias latitudes em direção ao Equador. O motivo do aprisionamento e arraste do gás é explicado na próxima seção. A cada rotação, as linhas de campo são mais e mais arrastadas e distorcidas próximo ao Equador, até que a densidade de linhas de campo cresce tanto que se estabelece uma configuração toroidal. Assim, a partir da tacoclina, a rotação diferencial solar transforma o campo poloidal, das regiões de moderadas e baixas latitudes, em tubos de fluxo de campo toroidal dentro do envelope convectivo, como ilustrado na Figura 4.14.

Por sua vez, pelo processo de flutuação magnética - quando $P_{int} < P_{ext}$ - frações de tubos de fluxo do campo toroidal formado sobem pelo envelope convectivo até a "superfície" solar onde afloram em alguns pontos na forma de um grupo de manchas solares. A

Figura 4.15 exibe um exemplo. A partir daí, os tubos de fluxo se projetam para a atmosfera solar – cromosfera e coroa - na forma de arcos magnéticos, na sua configuração mais simples, o que configura as chamadas regiões ativas. O grupo de manchas originado na "superfície" se apresenta inclinado com a mancha precursora, de uma polaridade magnética, mais próxima ao equador e a mancha seguidora, de polaridade contrária, mais próxima ao polo (Lei de Joy). Entretanto, as polaridades magnéticas das manchas "precursora" e "seguidora" são opostas nos hemisférios Norte e Sul do Sol (vide Figura 4.16). A intensidade dos campos magnéticos correspondentes às manchas solares no nível fotosférico pode atingir vários milhares de Gauss; já foram registradas medidas acima de 4000 G para o campo magnético de manchas solares na fotosfera.

FIGURA 4.14 - EVOLUÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO SOLAR DURANTE O INÍCIO DE UM CICLO DE ATIVIDADE (FONTE: CHOUDHURI, 2007)

FIGURA 4.15 – PROPRIEDADE DE FLUTUAÇÃO DE UM TUBO DE FLUXO MAGNÉTICO NO ENVELOPE CONVECTIVO DO INTERIOR SOLAR (FONTE: CHOUDHURI, 2007)

Por outro lado, sabe-se que existe uma circulação meridional do gás, do equador em direção aos polos, em cada hemisfério solar, observada pelo movimento latitudinal de pequenas estruturas magnéticas solares. A velocidade medida é da ordem de 10 m/s

(Komm et al., 1993). Após o decaimento de um grupo de manchas seu campo se dissipa para a região circundante por difusão turbulenta, com a polaridade da mancha precursora se difundindo mais para latitudes mais baixas e a polaridade da mancha seguidora se difundindo mais para latitudes mais altas, o que dá origem ao campo poloidal na "superfície" solar (mecanismo de Babcock-Leighton). Esse campo migra pela "superfície" em direção aos polos e acredita-se que desça até a tacoclina onde adquire migração em direção ao equador, completando o ciclo de fluxo meridional. Atingindo as moderadas latitudes a rotação diferencial transforma novamente esse campo poloidal em campo toroidal fechando o ciclo do dínamo solar, embora no novo ciclo as polaridades sejam inversas em relação ao ciclo anterior (Lei de Hale). Ressalte-se que processo idêntico ocorre no outro hemisfério solar embora as polaridades também sejam contrárias nos dois hemisférios. Esse processo leva em média 11 anos.

FIGURA 4.16 - (ESQUERDA) POLARIDADES DAS MANCHAS "PRECURSORA" E "SEGUIDORA" DO CAMPO MAGNÉTICO DE REGIÕES ATIVAS NOS HEMISFÉRIOS NORTE E SUL DO SOL DURANTE UM CICLO DE ATIVIDADE. (DIREITA) INVERSÃO DAS POLARIDADES MAGNÉTICAS DAS MANCHAS "PRECURSORA" E "SEGUIDORA" NO CICLO DE ATIVIDADE SEGUINTE (FONTE: NATIONAL SOLAR OBSERVATORY).

Quando do início do próximo ciclo de atividade as linhas de campo novamente inverterão seu sentido, desta forma repetindo o mesmo sentido do penúltimo ciclo.

Nos casos de regiões ativas bem evoluídas, mais típicas de épocas de grande atividade solar, sua configuração de campo magnético destas regiões é extremamente complexa, envolvendo a interação de vários arcos de tamanhos e dinâmica distintos. A Figura 4.17 representa de forma esquemática a possível geometria do campo magnético de uma região ativa evoluída.

É esta complexidade e dinamismo que propicia as condições necessárias para a ocorrência de instabilidades que levam à liberação da energia do campo magnético, gerando assim o fenômeno conhecido como "flare", associado à explosão solar observada em outras faixas de comprimentos de onda que não o óptico.

FIGURA 4.17 - CONFIGURAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO DE UMA REGIÃO ATIVA SOLAR EM ESTÁGIO EVOLUÍDO (FONTE: EXPERIMENTO EIT, SATÉLITE SOHO)

4.5 REGIÕES ATIVAS

Estas regiões estão situadas no interior de configurações de campo magnético em forma de arco – para simplificar - com linhas de fluxo magnético que se projetam pela cromosfera até a coroa solar, cujas extremidades - pólos magnéticos Norte e Sul - estão

presas na fotosfera associados às manchas; como se fosse um ímã gigante. Devido a ação destes campos, é nas regiões ativas que se observam os fenômenos conhecidos como explosões solares - "flare", que em Português significa fulguração, historicamente devido às observações pioneiras efetuadas na luz visível. Estas explosões ocorrem com freqüência muito maior nos períodos de máxima atividade do ciclo solar.

Um pouco de Física de plasma: Plasma se refere à matéria no estado em que os átomos de gás se encontram desprovidos de parte ou todos seus elétrons em uma distribuição quase-neutra (gás ionizado com concentrações praticamente iguais de elétrons e íons positivos). Acredita-se que 99% da matéria ordinária do Universo encontre-se neste que é considerado o 4º estado da matéria, daí a importância de seu estudo e conhecimento.

Neste estado, a matéria apresenta certas propriedades exclusivas que não são observadas seja no estado sólido, líquido ou gasoso. Entre as principais propriedades podemos citar: a tendência que o plasma tem de permanecer eletricamente neutro e a capacidade de emissão de luz quando em contato com alguma perturbação elétrica e magnética capaz de excitá-lo.

A Figura 4.18 apresenta os valores característicos do parâmetro β de plasma - razão entre a pressão cinética e a pressão magnética no meio = $2\ CnkT\ /\ (B^2/8\pi)$; n, densidade de elétrons, k, cte. Boltzmann, T, temperatura do meio, B, campo magnético, C, coeficiente de ionização - ao longo das 3 camadas da atmosfera solar. Por esta figura fica claro que a pressão magnética domina ($\beta < 1$) o meio na alta cromosfera e baixa coroa. Fora destas camadas pode ser visto claramente a inversão do parâmetro β para valores maiores que a unidade. Isto indica que a pressão cinética domina o meio naquelas camadas. É por este motivo que a grande maioria senão quase totalidade dos fenômenos solares "transientes", principalmente as explosões solares, ocorrem nas camadas onde $\beta < 1$. É exatamente aí que se encontram as chamadas regiões ativas.

4.6 CICLO DE ATIVIDADE

A maioria das características da emissão solar está diretamente relacionada à atividade solar. O aspecto mais marcante da atividade é o ciclo de cerca de 11 anos, período no qual o número de manchas solares cresce e atinge um máximo, decrescendo em seguida.

FIGURA 4.18 – PARÂMETRO β DE PLASMA PARA AS VÁRIAS CAMADAS DA ATMOSFERA SOLAR, DESDE A FOTOSFERA ATÉ A ALTA COROA ONDE HÁ A REGIÃO DE ACELERAÇÃO DO VENTO SOLAR. (FONTE: GARY, 2001).

A Figura 4.19 exibe a evolução dos ciclos solares desde 1.600 até próximo ao ano 2015.

No presente (2018), estamos próximo ao mínimo do atual ciclo (ciclo 24) de atividade solar. No início de um ciclo, manchas pequenas surgem em número reduzido em latitudes solares moderadas (30° - 40°), e vão se formando em grupos cada vez maiores e mais próximas ao equador solar, aumentando em número, conforme o ciclo evolui em direção ao máximo de atividade, decrescendo gradativamente quando o ciclo decai em direção ao mínimo. A Figura 4.20 ilustra bem esse comportamento observado ao longo de vários ciclos solares. O diagrama ilustra como a latitude de surgimento das manchas muda de acordo com a evolução dos ciclos solares, e é conhecido como "Diagrama Borboleta".

FIGURA 4.19 - EVOLUÇÃO DOS CICLOS SOLARES DESDE 1.600 (CENTRO). AS IMAGENS DO TOPO E DE BAIXO REPRESENTAM ASPECTOS DO DISCO SOLAR EM DIFERENTES ÉPOCAS AO LONGO DE UM CICLO: DE 1980 A 1989. (FONTE: http://www.hao.ucar.edu:80/public, http://www.wikiwand.com/en/Solar_cycle**).**

FIGURA 4.20 - "DIAGRAMA BORBOLETA" MOSTRANDO AS LATITUDES DE SURGIMENTO DAS MANCHAS SOLARES AO LONGO DE NOVE CICLOS SOLARES CONSECUTIVOS. (FONTE: http://www.hao.ucar.edu:80/public**).**

Este período leva cerca de 11 anos em média. Entretanto, como uma mesma polaridade magnética do Sol se repete sómente a cada 2 ciclos de atividade, o ciclo magnético solar é de cerca de 22 anos.

Durante o máximo do ciclo, também cresce muito a ocorrência de fenômenos energéticos que ocorrem nas regiões ativas associados às manchas. Além disso, também estão correlacionados aumentos de irradiância solar total e fluxo rádio integrado (10.7cm).

Estes fenômenos são chamados de explosões ou "flares" solares. A explosão solar pode estar associada ao fenômeno de "ejeção de massa coronal" e conseqüentemente também à ocorrência das chamadas tempestades geomagnéticas observadas na Terra. Outros efeitos importantes da atividade solar são os prejuízos causados em: comunicações, sistemas de navegação, órbita de satélites, exploração de recursos minerais, sistemas de fornecimento de energia, oleodutos, sistemas biológicos, e também os danos das radiações ionizantes de origem solar que podem atingir missões espaciais tripuladas, colocando em risco a vida dos astronautas pela exposição à grande quantidade de radiação. Estes efeitos referem-se ao que antes era chamado de relações Sol-Terra e hoje é designado por Clima Espacial.

4.7 EXPLOSÕES ("FLARES") SOLARES

As explosões solares foram observadas pela primeira vez, em 1 de Setembro de 1859, por R. C. Carrington and R. Hodgson, enquanto eles observavam manchas solares na luz visível. Como observaram um grande abrilhantamento chamaram o fenômeno de "flare" (que, em Inglês, significa abrilhantamento). Estes fenômenos caracterizam-se pela emissão de grandes quantidades de energia (10^{19} - 10^{25} J), em intervalos de tempo relativamente curtos, variando de dezenas de segundos até poucas horas para os fenômenos mais intensos. Um exemplo de "flare" solar – como o fenômeno ficou conhecido na luz visível – registrado em H-α é mostrado na Figura 4.21.

A energia cinética/térmica liberada no "flare" é proveniente da energia magnética e ocorre na atmosfera solar, nos locais conhecidos como regiões ativas, como descrito

anteriormente. Toda essa energia, que não chega a 10% de toda a energia emitida pelo Sol durante 1 segundo, provoca o aquecimento e aceleração dos elétrons, prótons e íons mais pesados presentes nos locais de liberação de energia e em sua vizinhança próxima. A interação das partículas energizadas com o meio ambiente provoca emissão de energia, na forma de radiação, que se distribui por grande parte do espectro eletromagnético (ver capítulo 2 para referência), estendendo-se desde ondas de rádio quilométricas a raios-X e raios-gama, podendo produzir também a emissão de partículas (íons e elétrons) energéticos. Uma explosão solar típica produz uma quantidade de energia equivalente àquela produzida pela usina hidrelétrica de Itaipu durante um período de cerca de 8 milhões de anos de operação a plena potência.

FIGURA 4.21 – EXEMPLO DE "FLARE" SOLAR OBSERVADO NO H-ALFA (FONTE: http://www.hao.ucar.edu:80/public).

Uma explosão solar também pode estar associada a expulsão de grandes quantidades de matéria com velocidades que variam de centenas a poucos milhares de quilômetros por segundo. Este fenômeno é conhecido como ejeção de massa coronal - designado por CME – o qual também pode ocorrer dissociado de qualquer explosão solar.

Algumas explosões solares também estão associadas à ocorrência das chamadas tempestades magnéticas na Terra. Quando muito intensos, esses fenômenos causam grande perturbação na magnetosfera terrestre, podendo até mesmo provocar um "blecaute". Uma explosão solar pode apresentar 3 fases distintas: 1) fase precursora, que caracteriza o período em que a liberação de energia é ativada. Neste estágio são emitidos raios-X moles; 2) fase impulsiva, na qual as partículas – elétrons, prótons e

íons - são energizados até energias bem acima de 1 MeV; esta fase pode ser observada em cerca de 90% das explosões; 3) fase de decaimento onde um aumento e decaimento graduais em raios-X moles podem ser observados.

Não é possível ver uma explosão solar olhando para o Sol. JAMAIS DEVEMOS OLHAR DIRETAMENTE PARA O SOL, SEJA A OLHO NU OU POR MEIO DE TELESCÓPIO, SEM A DEVIDA PROTEÇÃO DE UM FILTRO ESPECÍFICO PARA ESTA FINALIDADE, POIS PODE CAUSAR CEGUEIRA E DISTÚRBIOS DA VISÃO TEMPORÁRIOS OU ATÉ PERMANENTES. Instrumentos científicos desenvolvidos para esta finalidade são utilizados para registrar as características da radiação emitida durante uma explosão solar. Radiotelescópios e telescópios ópticos são utilizados para as observações em solo terrestre. Enquanto isso, a observação das emissões em ultravioleta, raios-X e raios-gama só é possível através de instrumentos específicos a bordo de balões estratosféricos ou de satélites no espaço. Isto porque as faixas de alta e média atmosfera bloqueiam a passagem destes comprimentos de onda até a superfície terrestre.

4.8 EJEÇÕES DE MASSA CORONAL

Como o próprio nome diz, são grandes quantidades (centenas de milhares a bilhões de toneladas) de matéria, entremeadas de linhas de campo magnético, que são expulsas do Sol durante um período de várias horas, formando uma enorme erupção que se expande para o espaço exterior a velocidades de várias centenas a poucos milhares de km/s (Figura 4.22). As CME são (des)acelerados conforme vão se movendo para o espaço exterior. As primeiras evidências deste evento dinâmico foram obtidas a partir das observações de um coronógrafo a bordo do satélite OSO-7, durante o período de 1971 a 1973.

Ainda não se sabe qual a causa destes fenômenos, e também não está certo de onde se originam. Mais de metade destes fenômenos encontram-se associada a proeminências eruptivas. O restante que acompanha os "flares" pode aparecer na forma de "surges" ou "sprays". Entretanto, em ambos os casos existe associação com instabilidades em proeminências. Além disso, também podem ocorrer na ausência de "flares" ou proeminências eruptivas. A freqüência das CME varia com o ciclo de atividade solar,

podendo ser observado cerca de um evento por semana ou menos, no mínimo do ciclo, enquanto que podem ocorrer até 2-3 eventos ou mais por dia nos períodos de máximo de atividade do ciclo. Sua morfologia varia desde um formato aproximado de jato até um halo (arco), que pode circundar todo o disco solar (360°) em casos extremos. A maioria das CME produzem ondas de choque que, quando se propagam em direção à Terra, percorrem a distância a partir do Sol tipicamente em cerca de 2 dias. A Figura 4.23 mostra uma comparação das dimensões de uma CME.

FIGURA 4.22 - SEQÜÊNCIA DE IMAGENS MOSTRANDO A OCORRÊNCIA DE UMA CME. (FONTE: http://www.hao.ucar.edu:80/public).

As CME rápidas podem quebrar o fluxo do vento solar - explicado a seguir - e produzir perturbações que atingem a Terra, às vezes com resultados perigosos e nocivos para as atividades humanas. Este fenômeno, em conjunto com os "flares" solares afeta diretamente o chamado "clima espacial". Atualmente, os experimentos "Large Angle and Spectroscopic Coronograph (LASCO)", a bordo do satélite "Solar Heliospheric Observatory (SOHO)", "Solar Terrestrial Observatory (STEREO)" e "Solar Dynamic Observatory (SDO)", observam o Sol para registro de CMEs diariamente.

FIGURA 4.23 – ILUSTRAÇÃO DAS DIMENSÕES DE UMA CME EM COMPARAÇÃO COM A TERRA. (FONTE: HTTP://ASTRO.IF.UFRGS.BR/ESOL/ESOL.HTML)

4.9 RELAÇÕES SOLARES-TERRESTRES (ATUAL - CLIMA ESPACIAL)

Os fenômenos associados à atividade solar estão mais estreitamente relacionados com alguns fenômenos que ocorrem na Terra do que podemos imaginar. Até o final do século XX isso era chamado de relações solares-terrestres. Atualmente, recebe a designação de Clima Espacial. Tal como os "flares", as CME, jatos de partículas e o vento solar também têem implicações importantes para a compreensão e a previsão dos efeitos da atividade solar na Terra e espaço. A seguir descrevemos algumas perturbações, influências, danos e riscos causados por esses fenômenos no ambiente terrestre. Em particular, alguns dos principais efeitos que causam nas atividades e sistemas tecnológicos que servem ao ser humano.

É importante salientar a escala de tempo na qual esses vários fenômenos deverão atingir o ambiente terrestre. Iniciando pelo “flare”, ou explosão solar como mais conhecida, trata-se de uma enorme emissão de energia na forma de radiação eletromagnética que, uma vez gerada, atinge a Terra em pouco mais de 8 minutos. Em seguida, temos os jatos de partículas energéticas produzidos tanto pela onda de choque de uma explosão solar

quanto pelo choque de uma CME. Esses jatos são constituídos de partículas relativísticas que podem atingir o ambiente terrestre em intervalos que vão de dezenas de minutos a poucas horas. Um intervalo de dezenas de horas a alguns dias separa a expulsão de uma CME a partir do Sol de sua chegada a nosso planeta. Por fim, como já mencionado o vento solar é liberado a velocidades dentro da faixa de 200 a > 800 km/s podendo atingir a Terra tanto após dois dias quanto até uma semana depois.

Contudo, mais importante são os efeitos que esses fenômenos solares causam no ambiente terrestre, desde os mais brandos até os mais severos e perigosos. Na sub-seção a seguir são dados exemplos dos vários tipos de efeito que fenômenos do clima espacial de origem solar causam no ambiente terrestre e atividades humanas.

4.9.1 – EFEITOS DO CLIMA ESPACIAL NO AMBIENTE TERRESTRE

A radiação eletromagnética emitida pelas explosões solares em UV e raios-X causa grande aumento da ionização da ionosfera terrestre. Além disso, também pode produzir o aquecimento das camadas da alta atmosfera. Neste caso, os efeitos que são observados vão desde a perturbação da órbita de satélites até um blecaute de rádio na atmosfera terrestre por várias horas, no caso de um fenômeno severo. Outros efeitos não menos importantes são as perturbações de sistemas de posicionamento e navegação.

O vento solar, perturba o ambiente terrestre principalmente de duas formas: a interação com a magnetosfera terrestre causa compressão na direção Sol-Terra e alongamento em forma de cauda da Terra para o espaço exterior; a interação das partículas do vento com atmosfera nas regiões de altas latitudes gera as auroras, como explicado na próxima seção. A deformação mencionada pode até gerar uma sub-tempestade geomagnética.

Quando uma CME atinge a Terra pode gerar uma tempestade geomagnética cujos efeitos vão desde danos nas comunicações via satélite até a produção de "blecautes". A onda de choque de uma CME gera um jato de partículas energéticas que podem danificar equipamentos eletrônicos de satélites e espaçonaves e irradiar astronautas de missões tripuladas com grandes doses de radiações ionizantes. Isto ocorre porque no

espaço não existem a magnetosfera e as camadas protetoras da atmosfera terrestre que absorvem e espalham a quase totalidade dessas radiações originadas fora da Terra.

O principal e mais perigoso efeito dos jatos de partículas energéticas é o grande poder ionizante que possuem quando interagem com a matéria. Neste caso, podem causar desde a degradação de painéis solares de satélites artificiais, a degradação e inutilização da eletrônica de satélites, sondas e missões espaciais, além da geração de sinais espúrios na resposta dos sistemas digitais que compõem instrumentos e detectores de satélites. E o fator mais preocupante é a irradiação de astronautas em missões tripuladas com doses letais de radiação.

Portanto, é necessário um maior conhecimento desses fenômenos relacionados ao "clima espacial" para se buscar da melhor forma possível prever sua ocorrência.

4.10 VENTO SOLAR

Trata-se de um fluxo de elétrons, prótons e íons positivos que são expulsos da coroa solar em alta velocidade (de 200 a mais de 800 km/s) e propagam-se pelo meio interplanetário. Existem dois tipos de vento, o lento (200-400 km/s) e o rápido (acima de 400 km/s), que possuem origem distinta no Sol. O vento lento parte dos chamados "streamers" coronais, pertencentes a regiões de latitudes relativamente baixas onde os campos magnéticos tendem a se apresentar com configurações em forma de arcos, principalmente durante os períodos ativos do ciclo de atividade solar. No topo desses arcos eventualmente se estabelece uma região onde o campo se projeta para o meio interplanetário formando a configuração designada "streamer coronal".

Por sua vez, dos chamados buracos coronais - regiões de campo magnético com configuração de linhas "abertas" - é expulso o vento solar rápido. Eventualmente, esse vento atinge e interage com a Terra causando tanto o fenômeno conhecido como aurora - quando interagindo com os gases da alta atmosfera - quanto perturbações no campo magnético, quando interagindo com a magnetosfera terrestre. O vento solar quando interage com a magnetosfera terrestre causa sua deformação na direção da linha Sol-

Terra, ocasionando sua compressão no espaço entre o Sol e a Terra e a formação de uma cauda da Terra em direção do espaço exterior, como pode ser visto na Figura 4.24.

FIGURA 4.24 - VENTO SOLAR E SUA INTERAÇÃO COM A MAGNETOSFERA TERRESTRE. A AÇÃO DO VENTO SOLAR PRESSIONA A MAGNETOSFERA EM DIREÇÃO AO ESPAÇO EXTERIOR.

Quando as partículas energéticas emitidas pelo Sol interagem com os gases da alta atmosfera terrestre, nas proximidades das regiões polares da magnetosfera terrestre, ionizam os átomos desses gases. Os íons e elétrons desses átomos ionizados, por sua vez, se recombinam para formar um átomo neutro. No momento em que isso acontece é emitida uma luz de cor característica do átomo que está se recombinando, e que também depende da energia das partículas que provocaram a ionização daquele átomo – fenômeno conhecido como aurora (dois exemplos nas Figuras 4.25 superior e inferior).

Como a atmosfera terrestre é composta por vários gases e a energia das partículas incidentes não é fixa pode-se observar luz de várias cores e com diversos padrões difusos. Este fenômeno ocorre principalmente em altas latitudes terrestres, podendo ser observado a olho nu, com as designações de boreal, no hemisfério Norte, e austral, no hemisfério Sul.

FIGURA 4.25 - EXEMPLOS DE FOTOS DE AURORAS OBTIDAS EM ALTAS LATITUDES DURANTE O PERÍODO DE MÁXIMO DO CICLO SOLAR 23. NA FIGURA SUPERIOR É MOSTRADA UMA AURORA OBSERVADA EM 20/03/01, ENQUANTO NA INFERIOR OUTRA AURORA OCORRIDA EM 17/04/01. (FONTE: HTTP://WWW.SPACEWEATHER.COM).

4.11 ESPECTRO SOLAR

O espectro da luz solar nos fornece várias informações. Inicialmente, sabendo que os átomos absorvem luz em comprimentos de onda específicos, a partir da análise da luz solar - comprimento de onda das linhas de absorção - através de um instrumento chamado espectroscópio, podemos identificar quais os elementos químicos que estão presentes no Sol. Outras informações podem ser a abundância dos elementos químicos e a temperatura das várias camadas da atmosfera solar onde estes elementos estão presentes. A abundância pode ser inferida a partir da intensidade da linha de um determinado elemento químico registrada no espectro. Enquanto isso, a temperatura pode ser estimada a partir da presença de linhas dos elementos em determinadas regiões do espectro. Por exemplo, a linha de 304 Å, do He II (He uma vez ionizado), observada na cromosfera, corresponde a uma temperatura de 60000 K, enquanto que a linha 195 Å do Fe XII, observada na coroa, corresponde a uma temperatura de cerca de 1,5 milhões de graus.

Um espectro de estrela tipo G2V, como é o caso do nosso Sol, mostra que a baixa atmosfera solar é fria o suficiente para apresentar linhas dos átomos de elementos metálicos. A maioria é de átomos neutros, particularmente aqueles com níveis de energia baixos o suficiente para serem excitados a 6000 K. Outro aspecto muito importante, indicado no tipo espectral, é que o estágio evolutivo atual do Sol é de uma estrela na seqüência principal – produzindo energia à custa do consumo do Hidrogênio com a síntese de Hélio e elementos mais pesados.

A Figura 4.26 adiante mostra o espectro solar dentro da banda da luz visível (3850 - 6900 Å). As linhas de absorção (escuras) de alguns elementos estão indicadas na Figura, como por exemplo H-α, H-β, H-γ, H-δ (do H), e linhas do Na, Ca, Mg e Fe.

Já a Tabela 4.2 apresenta uma relação de várias linhas observadas no espectro solar na faixa do ultravioleta (UV) e ultravioleta extremo (EUV). Na tabela estão indicados os íons dos elementos correspondentes ao comprimento de onda de cada linha observada, a temperatura associada e a região onde é observada.

FIGURA 4.26 – ESPECTRO SOLAR NA BANDA DE COMPRIMENTOS DE ONDA DA LUZ VISÍVEL (DENTRO DA FAIXA DE 3850 Å – 6900 Å).

TABELA 4.2 – LINHAS ESPECTRAIS DE ÍONS DE ELEMENTOS NO ESPECTRO SOLAR DO ULTRAVIOLETA E ULTRAVIOLETA EXTREMO

Elemento	Comprimento de onda (Å)	Temperatura (× 10^4 K)	Região de observação
Ca IX	821	63	Região de transição
Fe IX/X	171	100	Coroa
Fe XII	195	150	Coroa
Fe XII	1242	160	Coroa
Fe XV	284	200	Coroa
He I	584,3	2	Cromosfera
He II	304	6 – 8	Cromosfera
Mg IX	368	95 – 100	Coroa
Mg X	625	105 – 110	Coroa
N V	1238,8	18	Região de transição
Ne VII	356	40	Região de transição
O V	629,7	23 – 25	Região de transição
S VI	933	20	Região de transição
Si XII	520,7	200	Coroa
UV contínuo		* 10^4	Cromosfera
Contínuo	Luz branca	~0,6	Fotosfera

4.12 INTERIOR SOLAR E HELIOSISMOLOGIA

A maior parte do que se sabe sobre o interior solar está baseado em modelos teóricos do Sol, os quais foram sendo bem refinados, nas duas últimas décadas, com base no desenvolvimento de técnicas que fazem este tipo de sondagem. Cada modelo baseia-se em: princípios físicos básicos, algumas hipóteses sobre o interior solar e algumas propriedades observadas. Os princípios físicos são: taxa de irradiação aproximadamente igual à taxa de produção de energia e o material numa dada profundidade deve ser capaz de suportar o peso da matéria das camadas acima. As hipóteses devem levar em consideração, entre outros fatores, a importância de campos magnéticos internos e a taxa de rotação de camadas internas em torno do eixo solar. As principais propriedades observadas são: raio, massa total, luminosidade e composição química. Basicamente, um modelo assim calculado fornece estimativas numéricas de temperatura (T), pressão (P) e densidade (N_e) a qualquer distância do centro do Sol. Um exemplo de modelo solar é mostrado na Figura 4.27 a seguir.

Como visto na seção 4.3.2, a energia solar é produzida à custa da conversão de H em He^4. Neste caso, qualquer modelo confiável que explique a taxa de produção de energia observada deve levar em conta também a alteração nas abundâncias relativas dos elementos, conforme o H vai sendo consumido e o He^4 e elementos mais pesados vão sendo gerados, bem como as respectivas alterações de T, P e N_e.

Os modelos existentes atualmente representam bem o interior solar. Isto pode ser verificado através de técnicas que conseguem sondar as condições físicas (T, P, N_e) no interior do Sol, abaixo da "superfície" até quase o centro. Um meio de fazer isto é investigando as propriedades e características das oscilações solares.

Sabe-se que a "superfície" solar oscila se movendo para cima e para baixo com velocidades de até 0,5 km/s, à primeira vista de forma desordenada. Regiões da fotosfera sobem e descem, aparentemente de forma irregular ao longo de distâncias de muitos quilômetros e por períodos de tempo característicos de 5 minutos ou mais.

FIGURA 4.27 – MODELO SOLAR MOSTRANDO, DE CIMA PARA BAIXO, OS PERFÍS ESTIMADOS DE TEMPERATURA, PRESSÃO E DENSIDADE COM A PROFUNDIDADE NO INTERIOR SOLAR DESDE O CENTRO ATÉ A "SUPERFÍCIE". (FONTE: GREEN E JONES, 2004).

Contudo, em meados dos anos 70, verificou-se que pelo menos em parte trata-se de um efeito combinado de muitas oscilações globais de toda a "superfície" solar que individualmente são regulares e têem seu período característico. Algumas oscilações globais de baixa freqüência são capazes de viajar praticamente até o centro do Sol e refletir as condições lá existentes através de seus movimentos observados na "superfície" solar. Este método é similar àquele usado pelos sismologistas que investigam o interior da Terra. Por este motivo, o ramo de investigação das oscilações solares para sondagem das condições presentes no interior solar é chamado de heliosismologia.

4.13 EMISSÃO SOLAR NA BANDA DE ONDAS DE RÁDIO

A emissão solar em rádio origina-se no plasma da alta cromosfera e baixa coroa. As características de propagação de ondas de rádio dependem basicamente da densidade de elétrons nestas camadas: cada valor de densidade dos elétrons está relacionado a uma determinada freqüência crítica das ondas de rádio.

Considerando que freqüência e comprimento de onda de qualquer onda eletromagnética estão relacionados por:

$$f = v / \lambda$$

onde v é a velocidade da onda no meio, f a freqüência e λ o comprimento de onda. No caso particular de propagação no vácuo v = c (a velocidade da luz no vácuo, cerca de 300.000 km/s). Para uma onda se propagando num meio com propriedades distintas do vácuo, obtemos o índice de refração n desse meio pela relação entre as velocidades no vácuo e no meio:

$$n = c / v$$

Entretanto, num meio ionizado e magnetizado como a atmosfera solar, o índice de refração de ondas eletromagnéticas possui uma expressão bem mais complexa que, a grosso modo, depende da densidade de elétrons do meio e da freqüência de observação. Abaixo de uma determinada freqüência, designada como crítica para aquela densidade dos elétrons, o índice de refração torna-se imaginário e deixa de ocorrer propagação nesse meio – vide explicação na seção a seguir. Sabendo-se que a densidade decresce com o aumento da altura na atmosfera solar, pode-se observar em freqüências mais altas as camadas mais baixas, mais próximas à fotosfera.

A Figura 4.28 mostra o espectro solar desde ondas de rádio até o ultravioleta. Pode-se ver as emissões de Sol calmo, Sol ativo e de corpo negro em várias temperaturas.
A densidade de fluxo solar é igual àquela de um corpo negro irradiador em cerca de 6000 K, em comprimentos de onda menores do que 1 cm, mas é maior do que esta em comprimentos de onda maiores - corpo negro é um corpo que absorve toda a energia

radiante incidente sobre ele e, além disso, é o emissor de energia radiante mais eficiente que existe. Em comprimentos de onda de rádio, a radiação encontra-se entre as curvas do Sol calmo e do Sol ativo. As curvas finas fornecem a densidade de fluxo de corpos negros em várias temperaturas distintas.

Observações do Sol em ondas de rádio fornecem densidade de fluxo maior do que aquela correspondente a um corpo negro numa temperatura de cerca de 6000 K (obtida por observações na luz visível) como pode ser visto na Figura acima. Em comprimentos de onda acima de 1 cm o espectro solar se dispersa em duas curvas: a do Sol calmo e a do Sol ativo. A curva do Sol calmo indica o nível mínimo da radiação solar. No período de máximo de atividade, a intensidade da radiação solar se eleva, como ilustrado pela curva de Sol ativo.

FIGURA 4.28 – ESPECTRO SOLAR, DO ULTRAVIOLETA AOS COMPRIMENTOS DE ONDA DE RÁDIO - CURVA GROSSA (FONTE: KRAUS, 1986).

A emissão solar em rádio pode ser dividida em:

a) Emissão do Sol calmo em períodos de pouca ou nenhuma atividade solar (mínimo do ciclo de atividade) e;
b) Emissão do Sol ativo nos períodos de atividade solar.

Por sua vez a radiação do Sol ativo pode ser dividida em:

I) Componente de variação lenta, pode variar em períodos de dias, semanas ou meses e;
II) Componente explosiva caracterizada pela repentina liberação de enormes quantidades de energia acompanhadas de grande emissão de radiação eletromagnética, normalmente com amplo espectro, durante intervalos de segundos, minutos ou horas.

4.13.1 O SOL CALMO

Em ondas de rádio o Sol assume tamanhos distintos de acordo com o comprimento de onda observado. Em 1 cm ou menos, o Sol possui dimensões comparáveis àquelas no visível. Já em comprimentos de onda decimétricos o Sol assume um tamanho ligeiramente maior com um pico na distribuição radial de brilho perto do limbo. Em comprimentos de onda métricos o Sol assume dimensões ainda maiores e a distribuição de brilho tende a culminar no centro do disco. A Figura 4.29 abaixo ilustra bem este comportamento do Sol em 5 comprimentos de onda distintos.

Em comprimentos de onda menores a radiação solar origina-se perto da fotosfera, ao passo que em comprimentos de onda métricos ela é proveniente da alta coroa. Numa determinada freqüência f, a radiação provém basicamente de camadas que estão acima daquela cuja densidade N_e de elétrons corresponde à freqüência crítica, mencionada na seção anterior, dada pela expressão:

$$f \simeq \frac{e}{2\pi}\sqrt{\frac{N_e}{\varepsilon_0 m}}$$

onde: N_e - densidade dos elétrons, f - freqüência crítica, ε_0 - permitividade do vácuo, m - massa do elétron, e - carga do elétron.

Entretanto, geralmente ocorre intensa auto-absorção não permitindo que a radiação no fundamental escape do meio. A radiação no fundamental é observada apenas em condições especiais. A radiação do segundo harmônico geralmente encontra condições para se propagar e escapar do meio para o espaço interplanetário. Neste caso, pode ser detectada na Terra usando-se um radiotelescópio que opere na freqüência apropriada.

FIGURA 4.29 – DISTRIBUIÇÃO DE BRILHO SOLAR EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA AO CENTRO DO DISCO, EM RAIOS SOLARES, MEDIDA EM CINCO COMPRIMENTOS DE ONDA DE RÁDIO DISTINTOS ENTRE 1 CM E 5 M (FONTE: KRAUS, 1986)

4.13.2 A COMPONENTE DE VARIAÇÃO LENTA OU COMPONENTE-S

A designação componente de variação lenta ou componente-S surgiu originalmente da descoberta de McCready et al. (1947) da emissão solar em rádio, de todo o disco solar integrado, efetuadas em uma única freqüência fixa (200 MHz) na região de ondas métricas. Basicamente, a componente de variação lenta consiste num excesso de radiação que se origina em regiões ativas localizadas acima de manchas solares e praias

cromosféricas, que estendem-se da cromosfera até a baixa coroa, e que são caracterizadas por valores elevados de densidade de elétrons, temperatura e campo magnético em relação ao meio circundante. Por meio de medidas sistemáticas da emissão solar em rádio, verificou-se que havia uma variabilidade lenta no fluxo solar integrado e que esta variabilidade apresentava um caráter periódico cujo período correspondia a uma rotação solar média, cerca de 27 dias. Verificou-se uma correlação direta entre essa componente e a área e o campo magnético de manchas presentes no disco solar para ondas de rádio centimétricas. Estudos de Wild et al. (1963) em ondas centimétricas (3 - 10 cm) também mostraram que a temperatura de brilho - temperatura de um corpo negro emissor com o mesmo brilho que a fonte observada - de todo o disco solar era constituída de um nível de fundo (a temperatura do Sol calmo) adicionado da componente de variação lenta que, a grosso modo, era proporcional à soma das áreas das manchas presentes no disco solar.

Durante os anos 80, pouco progresso foi alcançado nas observações da componente-S. Apesar da grande resolução angular alcançada (da ordem de décimos de segundo de arco), a resolução em freqüência permaneceu muito limitada a duas ou três freqüências discretas e separadas, enquanto a resolução temporal não foi muito melhorada além de minutos ou dezenas de segundos.

Em 1984, pela primeira vez foram realizadas observações de regiões ativas com melhores resoluções espacial ($\approx 3'' \times 4''$ de arco), espectral (12,5 MHz) e temporal (10 s) utilizando o interferômetro Very Large Array (VLA, em Socorro, Novo México), em 10 freqüências próximas e distintas dentro da faixa de 1440 a 1720 MHz (Willson, 1985). Foram observados picos de temperatura de brilho entre $1{,}5 \times 10^6$ e $4{,}0 \times 10^6$ K, sugerindo que essas fossem as fontes correspondentes em rádio aos arcos coronais vistos em raios-X moles (raios-X com energias até 20 keV).

A importância das investigações sobre a componente de variação lenta está no fato de que, a partir de seu estudo, podemos obter informações sobre: os parâmetros físicos da região ativa (densidade, temperatura dos elétrons e campo magnético) e a respeito de suas variações antes e depois de fulgurações solares. Além disso, sua importância se estende à solução dos seguintes problemas básicos das fulgurações:

1) armazenamento de energia;

2) liberação de energia;

3) transporte da energia liberada;

4) possível predição da ocorrência de fulgurações.

4.13.3 A COMPONENTE DE VARIAÇÃO RÁPIDA OU COMPONENTE EXPLOSIVA

A componente explosiva consiste em abruptas liberações de grande quantidade de energia (10^{26} – 10^{32} erg) acompanhadas de emissão de radiação eletromagnética, associadas às fulgurações ("flares") solares, que podem durar de dezenas de segundos a algumas horas para as explosões impulsivas e graduais, respectivamente. A radiação eletromagnética associada pode ser observada numa ampla faixa de comprimentos de onda, desde ondas kilométricas de rádio até raios-X e raios-gama.

A faixa de freqüências das explosões solares em rádio compreende mais de 8 ordens de grandeza, de < 30 kHz até > 1 THz. Dentro desta faixa espectral, alguns mecanismos de emissão disputam a predominância. Das baixas freqüências até dezenas de GHz, essas explosões podem ser grosseiramente subdivididas em dois grandes grupos, de acordo com o mecanismo de emissão: o grupo das explosões em ondas decimétricas-métricas-decamétricas e o grupo das explosões em microondas. Na ampla faixa dos 30 kHz até cerca de 1 GHz, conhecida como banda decamétrica-métrica-decimétrica, os fenômenos observados são todos devido a emissão de plasma (devido à presença da turbulência de Langmuir no plasma - um tipo de turbulência que pode ocorrer na atmosfera solar; a energia das ondas geradas por esta turbulência, ou ondas de Langmuir, pode ser convertida parcialmente em energia de ondas eletromagnéticas que escapam do plasma, próximo da freqüência de plasma ou seu segundo harmônico). A dominância deste mecanismo produz um pequeno conjunto de 5 tipos principais de explosões designadas com algarismos romanos. Para maiores detalhes sobre as explosões tipos I – V vide a próxima seção.

A emissão de plasma perde sua importância em freqüências acima de 1 GHz. Mecanismos de emissão completamente diferentes dominam nessa banda conhecida como banda das microondas. Durante explosões impulsivas, o mecanismo dominante é

um dos tipos de emissão gerada por elétrons espiralando em torno das linhas de campo magnético ou giromagnética, a saber: cíclotron, girossíncrotron ou síncrotron, dependendo da energia dos elétrons emissores. A emissão girossíncrotron (devido a elétrons espiralando com velocidades de décimos da velocidade da luz no vácuo, típicas de explosões solares) pode ser de origem térmica ou não-térmica, e é a principal emissão da componente explosiva nesta banda de freqüências. Entretanto, às vezes, as emissões cíclotron (devido a elétrons espiralando com velocidades mais baixas) e bremsstrahlung (radiação devido à frenagem dos elétrons no meio) podem ser importantes nas baixas freqüências de microondas, por exemplo nas fases de pré-fulguração ou de decaimento da fulguração.

4.13.4 FULGURAÇÕES SOLARES E FENÔMENOS ASSOCIADOS EM ALGUNS COMPRIMENTOS DE ONDA

As fulgurações foram primeiramente observadas de forma sistemática na luz do H-α ($\lambda \cong 6563$ Angstrom) - comumente, uma intensa linha de absorção formada na cromosfera - ocorrem na cromosfera e coroa próxima, nas vizinhanças da linha neutra do campo magnético, particularmente onde há fortes gradientes de intensidade ou direção do campo, mas não diretamente sobre as manchas solares. Geralmente, ocorrem no estágio máximo de desenvolvimento do campo magnético, quando está mais intenso e complexo, produzindo grande quantidade de radiação. Grandes fulgurações podem durar mais de 1 hora ao passo que as pequenas, muito mais comuns, tipicamente alguns minutos. A Figura 4.30 abaixo mostra as relações temporais entre as emissões nos vários comprimentos de onda para uma fulguração típica.

A maior parte dos 10^{26} a 10^{32} erg de energia irradiada está na forma de raios-X moles, mas quantidades comparáveis ou mesmo maiores de energia podem estar presentes na forma de ondas de choque, campos magnéticos e energia mecânica da matéria ejetada. Entretanto, mesmo a mais potente fulguração produzida pelo Sol não é mais energética do que a luminosidade solar integrada por cerca de 1 s. Por estudos em H-α, foram deduzidas densidades de 10^{10} cm^{-3} e temperaturas de 10^4 e 10^5 K. A maioria das fulgurações em H-α são relativamente pequenas e compactas, $\leq 30''$ de arco. Mais recentemente, observações em raios-X e microondas mostraram que próximo à base da coroa, durante fulgurações solares, as temperaturas excedem 10^7 K e uma grande parte

da energia da fulguração está neste plasma de 10^7 K. Desta forma, o fenômeno cromosférico, detectável em H-α, é um aspecto secundário das fulgurações solares.

FIGURA 4.30 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS DIFERENTES FASES DE UMA FULGURAÇÃO SOLAR TÍPICA COMO OBSERVADA EM RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA E PARTÍCULAS EMITIDAS (FONTE: SVESTKA, 1976).

Há três fases de desenvolvimento da fulguração: (i) um estágio pré-fulguração de abrilhantamento gradual que normalmente dura alguns minutos; (ii) uma fase impulsiva ("flash") com duração de alguns minutos quando a taxa de liberação de energia é maior e os fótons mais energéticos e (iii) uma fase principal podendo durar até algumas dezenas de minutos quando a energia é irradiada principalmente em raios-X moles.

O estágio pré-fulguração é observado em muitas mas não todas as fulgurações e consiste de emissões fracas e crescentes lentamente em H-α, raios-X moles e ondas de rádio centimétricas. A fase impulsiva é observada na maioria das fulgurações e consiste de abrilhantamentos rápidos e intensos em raios-X duros, H-α e ondas de rádio (e às vezes em luz branca e raios-gama), enquanto em raios-X moles é o período de aumento mais rápido no fluxo. A interpretação destes fenômenos exige energias dos elétrons (E) de 10 a 200 keV ou temperaturas dos elétrons de 1 a 20 $\times$ 10^8 K. Durante a fase principal, ou estendida, a fulguração atinge sua maior área e produção de energia. Neste estágio, o grosso da energia irradiada provém de um plasma moderadamente quente (1 a 3×10^7 K).

Enquanto que muitas fulgurações passam pelas três fases, existem muitas variações, por exemplo, com muitas passando sómente pela fase impulsiva. Em algumas fulgurações grandes, contudo, observações de raios-X duros, emissão de rádio e de partículas energéticas demonstram a presença prolongada de um número relativamente pequeno de elétrons e íons relativísticos (com velocidades de frações da velocidade da luz).

Na região do ultravioleta e ultravioleta extremo do espectro que cobre a faixa de $\approx$ 10 a $\approx$ 300 nm, as fulgurações explosivas têem características temporais semelhantes às explosões em raios-X duros e microondas indicando que são causadas pelos elétrons rápidos da fase impulsiva.

Em raras ocasiões as fulgurações produzem raios-gama. Comumente, mas não sempre, explosões em raios-gama são parte da fase impulsiva das fulgurações solares, as quais duram sómente uns poucos minutos, e estão intimamente relacionadas às explosões em raios-X e microondas.

Há uma estreita correlação entre os fluxos de pico e os perfís temporais de explosões em microondas e raios-X duros. As explosões freqüentemente iniciam com um precursor, um lento e relativamente fraco aumento no fluxo que começa poucos minutos antes do disparo da fulguração. O início da maioria das fulgurações é marcado pela fase impulsiva, na qual o fluxo aumenta rapidamente; pode variar abruptamente em uns poucos minutos, e então decai. O declínio é em princípio rápido, mas depois

freqüentemente evolui na fase de pós-explosão com decaimento lento e longo que pode durar de uns poucos minutos a uma hora. Nos eventos muito grandes, esta última fase é mascarada por outro fenômeno conhecido como explosão "extensa" na qual, após a fase impulsiva, o fluxo cresce lentamente outra vez e permanece alto, às vezes por mais de uma hora. Estas explosões são relativamente raras, mas importantes por causa da energia excepcionalmente alta das partículas envolvidas.

Os raios-X moles fornecem a maior parte da radiação da fulguração. O plasma que emite raios-X moles, com $T \approx 10^7$ K, carrega a maior parte da energia da fulguração na atmosfera solar mais baixa. Os raios-X moles incluem radiação no contínuo e linhas de emissão de elementos altamente ionizados como: oxigênio, cálcio e ferro. Numa fulguração típica os raios-X moles manifestam as três fases. É durante a fase impulsiva que aumenta mais rapidamente a temperatura do plasma de raios-X moles. Este plasma geralmente está confinado a uma ou mais configurações magnéticas ("loops" ou arcos magnéticos) situados próximo à linha neutra do campo magnético.

As explosões em ondas métricas surgem relativamente alto na coroa, geralmente fora das dependências da região ativa que é a origem de todos os processos de radiação considerados até agora. As explosões mais rápidas e mais primitivas, ocorrem durante a fase impulsiva da fulguração e estão relacionadas à passagem de feixes de elétrons sub-relativísticos (com velocidades de pequenas frações da velocidade da luz) através da coroa. As explosões tipo III e tipo V ocorrem dentro de poucos segundos a poucos minutos da fase impulsiva de uma fulguração. A velocidade com a qual a energia é transportada através da coroa é ~ 0,1-0,3 c, sugerindo transporte por elétrons energéticos. A explosão tipo V tem melhor correlação com explosões em microondas. Avanços nas instrumentações, com melhoria nas resoluções em tempo e em freqüência bem como aumento da sensibilidade, possibilitaram a detecção de explosões tipo III também na faixa de microondas (MacLean e Labrum, 1985).

Um segundo grupo mais lento de explosões (tipos II e IV) segue uns poucos minutos após a fase impulsiva e pode continuar por até cerca de uma hora. Estas explosões estão associadas com ondas de choque e movimentos de massa na coroa. As explosões tipo II e tipo IV dinâmica podem ocorrer separadamente ou em conjunto, neste caso, a explosão tipo II precede a tipo IV. Todas estas explosões são relativamente raras, talvez

uma ou duas por dia durante o período de máximo do ciclo de atividade solar (MacLean e Labrum, 1985).

O estágio final de uma fulguração, em comprimentos de onda métricos é a fase de tempestade que ocorre durante o decaimento da fulguração. É designada como "tempestade tipo I" e talvez sua designação mais simples seja de "fase tempestiva", consistindo num período de aumento de atividade que se inicia de algumas dezenas de minutos a uma hora após a fase impulsiva, e que pode durar por muitas horas ou mesmo dias. A fase de tempestade, pode ser devido a um rearranjamento natural dos campos magnéticos na coroa, após o surgimento de fluxo adicional na estrutura pré-existente de campo, como um resultado da passagem de uma ejeção de massa coronal e seus campos magnéticos associados (MacLean e Labrum, 1985).

4.14 IMPORTÂNCIA DAS PESQUISAS CIENTÍFICAS SOBRE O SOL

As atividades humanas estão cada vez mais dependentes de alta tecnologia. Por sua vez, os produtos dessa alta tecnologia são extremamente sensíveis à atividade solar e seus efeitos associados que podem atingir a Terra. Logo, as atividades humanas são direta ou indiretamente perturbadas pelos efeitos da atividade solar. Então, 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 os prejuízos que causam nas atividades humanas. Neste sentido, durante as últimas décadas, vários países têem criado programas para atender a sociedade em questões relacionadas ao clima espacial, e os efeitos causados no ambiente terrestre e nas atividades humanas pelos fenômenos que ocorrem no espaço extra-terrestre, principalmente, mas não exclusivamente, aqueles que ocorrem no Sol.

REFERÊNCIAS

Bhatnagar, A.; Livingston, W. World Scientific Series in Astronomy and Astrophysics Vol. 6 - **Fundamentals of Solar Astronomy.** Singapura: World Scientific Publishing Company, 2005.

Bishop Web Works. **Spaceweather.com.** [on-line]. <http://www.spaceweather.com>, 22/06/2001.

Bishop Web Works. **Sunspots and the solar cycle.** [on-line]. <http://www.sunspotcycle.com>, 22/06/2001.

Brekke, P.; Thompson, W.T.; Woods, T.N.; Eparvier, F.G. The extreme-ultraviolet solar irradiance spectrum observed with the Coronal Diagnostic Spectrometer (CDS) on SOHO. **The Astrophysical Journal**, Vol. 536, 959, 2000.

Burnell, S.J.B.; Green, S.F.; Jones, B.W.; Jones, M.H.; Lambourne, R.J.A.; Zarnecki, J.C. **An Introduction to the Sun and Stars.** Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

Charbonneau, P.; White, O. R.. **The sun: a pictorial introduction.** [on-line]. <http://www.hao.ucar.edu:80/public/slides/slides.html>, 22/06/2001.

Choudhuri, A.R. In: **Kodai School on Solar Physics (AIP Conference Proceedings 919),** Eds. Hasan, S.S. and Banerjee, D., pp. 49-73, 2007.

Curdt, W.; Brekke, P.; Feldman, U.; Wilhelm, K.; Dwivedi, B.N.; Schühle, U.; Lemaire, P. The SUMER spectral atlas of solar disk features. **Astronomy & Astrophysics**, Vol. 375, 591, 2001.

Dwivedi, B.N.; Parker, E.N. **Dynamic Sun.** Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

Gary, G.A. Plasma beta above a solar active region: rethinking the paradigm. **Solar Physics**, Vol. 203, 71, 2001.

Green, S. F.; Jones, M.H. **An Introduction to the Sun and Stars.** Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

Hathaway, D. H. **Solar physics.** [on-line]. <http://science.msfc.nasa.gov/ssl/pad/solar>, 22/06/2001.

Kippenhahn, R. **Discovering secrets of the sun.** Chichester: John Wiley & Sins, 1994.

Komm, R.W.; Howard, R.F.; Harvey, J.W. Meridional Flow of Small Photospheric Magnetic Features. **Solar Physics,** Vol. 147, 207, 1993.

Kraus, J.D. **Radio Astronomy.** Powell: Cygnus-Quasar Books, 2nd ed., 1986.

Lang, K.R. **The Cambridge encyclopedia of the sun.** Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

MacLean, D.J.; Labrum, N.R. **Solar Radiophysics**, Cambridge University Press, 1985.

McCready, L.L; Pawsey, J.L.; Payne-Scott, R. In: **Proceedings of the Royal Society,** v. 190, pp. 357-375, 1947.

National Astronomical Observatory ROZHEN [on-line] <http://sob.nao-rozhen.org/content/basic-solar-parameters-and-information>, 27/04/2017.

Oliveira Filho, K. S.; Saraiva, M. F. O. **O Sol - a nossa estrela.** [on-line]. <http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm>, 22/06/2001.

Pawsey, J.L.; Payne-Scott, R.; McCready, L.L. **Nature,** 157, 158, 1946.

Phillips, K.J.H. **Guide to the sun.** Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

Phillips, K.J.H.; Feldman, U.; Landi, E. **Ultraviolet and X-ray spectroscopy of the solar atmosphere.** Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

Stix, M. **The Sun – An Introduction.** Physics and Astronomy online library: Springer, 2004.

Svestka, K. **Solar Flares.** Dordrecht, D. Reidel, 1976, 400p.

Wild, J.P.; Smerd, S.F.; Weiss, A.A. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics,** Vol. 1, pp. 291-366, 1963.

Willson, R.F. VLA observations of solar active regions at closely spaced frequencies - Evidence for thermal cyclotron line emission. **The Astrophysical Journal,** Vol. 298, 911, 1985.

Zirin, H. **Astrophysics of the sun.** New York: Cambridge University Press, 1988.

Capítulo 5

FORMAÇÃO DE ESTRELAS

José Williams Vilas Boas

Revisão de junho/2007

E-mail: williams.boas@inpe.br

FORMAÇÃO DE ESTRELAS

Sumário

5.1. INTRODUÇÃO....4

5.2. ONDE NASCEM AS ESTRELAS?....5

5.3. ONDE ESTÃO AS NUVENS MOLECULARES. 8

5.4. COMO NASCEM AS ESTRELAS?....10

5.4.1. EMISSÃO DE CORPOS DE BAIXAS TEMPERATURAS....12

5.4.2. O COLAPSO DOS GLÓBULOS....14

5.4.2.1. MASSA CRÍTICA E TEMPO DE COLAPSO....16
5.4.2.2. QUAL O PAPEL DO CAMPO MAGNÉTICO NO COLAPSO?....17
5.4.2.3. QUAL O PAPEL DAS SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS?....19

5.5. CONSEQUÊNCIAS DO NASCIMENTO DE UMA ESTRELA....20

5.5.1. ESTRELAS MASSIVAS O E B (M DA ORDEM DE 10 MASSAS SOLARES)....21

5.5.2. ESTRELAS DE PEQUENA MASSA (M DA ORDEM DE 1 MASSA SOLAR) 23

5.5.3. ROTAÇÃO DAS NUVENS....24

5.6. BIBLIOGRAFIA....25

Lista de Figuras

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DA MOLÉCULA DE CO.

FIGURA 2 -DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS NUVENS MOLECULARES GALÁXIA, DETERMINADA A PARTIR DE CONTAGEM DE ESTRELAS (CAMBRÉSY ET AL. 1999)

FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO AQUECIMENTO DA REGIÃO CENTRAL DE UM GLÓBULO POR UMA ESTRELA EM SEUS ESTÁGIOS PRIMORDIAIS.

FIGURA 4 – IMAGENS ÓPTICA, INFRAVERMELHO E RÁDIO DO GLÓBULO COMETÁRIO VG33.

FIGURA 5 – REPRESENTAÇÕES FÍSICA (5A) E MATEMÁTICA (5B) DA COMPETIÇÃO ENTRE OS MECANISMOS QUE PODEM INIBIR OU DESENCADEAR O COLAPSO DE UM GLÓBULO.

FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS ESTÁGIOS EVOLUTIVOS DO COLAPSO DE UM GLÓBULO.

FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS ESTÁGIOS POSTERIORES AO NASCIMENTO DAS ESTRELAS.

5.1. INTRODUÇÃO

As tentativas mais antigas para explicar o que poderia ser uma estrela, datam de antes de Cristo. Como em outras áreas do conhecimento, a contribuição dos filósofos antigos para o entendimento do universo não poderia deixar de ser mencionada mesmo em relação a esse problema tão específico que é o nascimento de uma estrela. Abaixo seguem as idéias de alguns desses pensadores, as quais exibem uma profunda relação entre suas experiências com o mundo palpável e a suas capacidades de transcendência. Merece destaque o pensamento de Anaximandro (610 a.c.) segundo o qual "***O Sol e a Lua são anéis de fogo circundados pelo ar***" e de seu discípulo Anaximenes que propunha que "O ar é a substância básica da qual se originaram todas as coisas". Proposições apoiadas em conceitos mais abstratos também foram apresentadas, dentre as quais se destaca a proposta de Heráclito de que o Universo se equilibrava entre duas forças e que o fogo tinha primazia como agente de mudanças. Ele afirmava que o "Os corpos celestes são taças contendo fogo". Outras propostas, invocando a idéia de um criador, foi apresentada por Anáxagora (476 a.c.) e sugeria que "No princípio o Universo era uma mistura uniforme sem movimento. A "mente" entrou em ação e fez com que todo o sistema girasse; no vórtice resultante a matéria fria, densa e escura ficou no centro, dando origem à Terra, enquanto toda a matéria quente, seca e rarefeita era expulsa. O Sol, e a Lua foram arrancados da Terra e aquecidos por fricção enquanto giravam no redemoinho de matéria". Ainda antes de Cristo, Empedocles tentou interpretar o Universo como sendo composto dos elementos básicos do mundo (terra, ar, água e fogo) mais uma força de atração (***amor***) e uma força de repulsão (***ódio***).

Antes de partir para as idéias que surgiram durante o Renascimento, após um longo período de estagnação do pensamento humano sobre o universo, vale a pena mencionar o pensamento do chinês Chi Meng (25 a 250 d.c.), segundo o qual "O céu era vazio e sem substância...não tendo fronteiras. O Sol e a Lua e as estrelas flutuavam no espaço". Essa é uma concepção bastante avançada do Universo e uma das ultimas de que se tem conhecimento após a humanidade mergulhar na Idade Média. Mesmo assim ela, como algumas outras, não discute a natureza das estrelas.

Finalmente, **Laplace** (1749-1827) propôs que o Sistema Solar nasceu de uma nuvem de gás primitiva em rotação (Nebulosa Solar). Esse modelo estabeleceu a relação definitiva, comprovada posteriormente, entre o nascimento de uma estrela e uma nuvem de gás progenitora. Devido à similaridade entre as proposições, vale a pena mencionar o pensamento dos filósofos pré-socráticos Anaximandro e Anaximenes (~600 a.c.) segundo os quais "A Terra e todo corpo material se formaram da condensação de uma massa de ar giratória".

Dessa forma, surge a seguinte questão:

Se as estrelas se formaram de uma nuvem progenitora, onde está essa nuvem ou o que restou dela?

Todas as estrelas já estão formadas ou ainda existem estrelas se formando?

5.2. ONDE NASCEM AS ESTRELAS?

Parece simples a idéia de Laplace de que uma estrela tem como progenitora uma nuvem de gás. Hoje essa idéia é bem aceita, mas para que isso acontecesse houve uma discussão relacionada com a existência dessas nuvens, que se arrastou por centenas de anos. Embora fosse fácil ver as estrelas devido a seus brilhos intensos, não era fácil observar as nuvens de gás e provar que as estrelas nasciam dentro delas.

A primeira observação direta dessas nuvens foi feita por John Hartman em 1904. Ele observou linhas espectrais na direção de muitas estrelas as quais não pareciam se originarem nas estrelas. Apesar dessa descoberta, sugerir a existência de um gás no espaço interestelar, somente 18 anos mais tarde é que a comunidade científica aceitou a hipótese de que essas emissões poderiam ser geradas em uma nuvem de gás localizada na vizinhança das estrelas. Descartavam totalmente a hipótese de que essas linhas poderiam ter sido geradas em uma nuvem de gás localizada entre o sistema solar e as estrelas que estavam sendo observadas. Apenas no início da década de 60 é que essa questão foi definitivamente resolvida. Nessa época, vários átomos e moléculas simples

(H, H+, Na, Ca, CH, CH+, e CN) tinham sido observados no espaço entre as estrelas, consolidando definitivamente a hipótese de que as nuvens interestelares realmente existiam. Dentre essas substâncias, as observações de Hidrogênio mostraram que não só existiam nuvens interestelares, como também um gás tênue preenchendo quase toda a Galáxia.

Com esse resultado, a comunidade científica não tinha com duvidar da existência dessas nuvens. Mesmo assim, ainda argumentavam que elas não poderiam ser densas o suficiente para conter moléculas complexas, poli-atômicas. Essa hipótese também foi descartada ainda no final da década de 60, quando cientistas da universidade de Berkley, California, observaram emissões das moléculas de água (H_2O) e amônia (NH_3) em nuvens de gás localizadas na direção do centro de nossa Galáxia, provando assim que nessas nuvens existiam moléculas poliatômicas. Finalmente, foi estabelecido que as nuvens interestelares, realmente existiam.
Com o grande progresso tecnológico da microeletrônica a partir da década de 60, ocorreu uma evolução considerável no conhecimento das nuvens moleculares. Para se ter uma idéia desse progresso, da década de 70 até os dias de hoje, foram descobertas mais de 110 moléculas nessas nuvens interestelares, algumas muito simples contendo dois átomos, até aquelas mais complexas contendo mais de 15 átomos (Tabela I). Moléculas ainda maiores foram descobertas recentemente sob a forma de grãos sólidos contendo várias dezenas de átomos, denominadas Hidrocarbonetos Poli-Aromáticos (HPA).

Para que algumas dessas moléculas sejam formadas, são necessárias regiões com densidades muito altas (10^{6-7} cm^{-3}), indicando que essas nuvens não são objetos de densidade homogênea.

Agora, conhecendo com mais detalhe a constituição das nuvens interestelares, pode-se retornar às hipóteses de Laplace e dos pré-socráticos Anaximandro e Anaximenes, e procurar em nossa Galáxia as nuvens moleculares para verificar se as estrelas realmente nascem dentro delas e como se dá esse processo.

TABELA I - MOLÉCULAS INTERESTELARES E CIRCUNSTELARES IDENTIFICADAS

H_2(IV)	**CO**	NH_3	CS	$NaCl^*$
HCl	SiO	SiH_4^* (IV)	SiS	$AlCl^*$
H_2O	SO_2	C_2 (IV)	H_2S	KCl
N_2O	OCS	CH_4	PN	AlF^*
HF				

Nitrilos e derivados de Acetileno.

C_3 (IV, UV)	HCN	CH_3CN	HCN	$C2H_4$ (IV)
C_5 (IV)	HC_3N	CH_3C_3N	**HNCO**	C_2H_2 (IV)
C_3O	HC_5N	CH_3C_5N	HNCS	
C_3S	HC_7N	CH_3C_2H	HNCCC	
	$HC_{11}N$	CH_3CH2CN	HCCNC	
	HC_2CHO	CH_3CHCN		

Aldeídos, Álcool, Esteres, Acetonas, Amidos e moléculas relacionadas.

H_2CO	**CH_3OH**	**HCOOH**	CH_2NH	CH_2CC
H_2CS	**CH_3CH_2OH**	$HCOOCH_3$	CH_2NH_2	CH_2CCC
CH_3CHO	CH_3SH	$(CH_3)_2O$	NH2CN	
NH_2CHO	$(CH_3)_2CO$	H_2CCO	CH_3COOH	

Moléculas Cíclicas

C_3H_2	SiC_2	c-C_3H	CH_2OCH_2	

Ions Moleculares

CH^+ (VIS)	HCO^+	$HCNH^+$	H_3O^+	HN_2^+
HCS^+	$HOCO^+$	HC_3NH^+	HOC^+	H_3^+ (IV)
CO^+	H_2COH^+	SO^+		

Radicais

OH	C_2H	CN	C_2O	C_2S
CH	C_3H	C_3N	NO	NS
CH_2	C_4H	$HCCN^*$	SO	SiC^*
NH (UV)	C_5H	CH_2CN	HCO	SiN^*
NH_2	C_6H	CH_2N	MgNC	CP^*
HNO	C_7H	NaCN	MgCN	
C_6H_2	C_8H	C_5N		

NOTAS. O (*) SIGNIFICA QUE A SUBSTÂNCIA QUÍMICA FOI OBSERVADA NO ENVOLTÓRIO DE GÁS DE UMA ESTRELA. IV, UV E VIS SIGNIFICA QUE ESSAS SUBSTÂNCIAS FORAM OBSERVADAS ATRAVÉS DE SUAS EMISSÕES NO INFRAVERMELHO, ULTRAVIOLETA E VISÍVEL. TODAS AS OUTRAS FORAM OBSERVADAS ATRAVÉS DE SUAS EMISSÕES EM ONDAS DE RÁDIO. EM NEGRITO ESTÃO INDICADAS ALGUMAS MOLÉCULAS OBSERVADAS EM GELOS.

5.3. ONDE ESTÃO AS NUVENS MOLECULARES.

Dentre as várias moléculas listadas na tabela 1, o monóxido de carbono (CO) foi uma das mais utilizadas para se estudar as nuvens moleculares distribuídas em nossa galáxia. Essa molécula é importante porque é muito abundante nas nuvens de gás e emite radiação em regiões de baixíssimas temperaturas (~ 50 K ou –223 ^{0}C) com densidades típicas das nuvens interestelares (! 10^2 cm^{-3}). Embora a densidade dessas nuvens seja muito baixa, se comparada à densidade da atmosfera na superfície da Terra (>10^{18} cm^{-3}), ela é alta se comparada com muitas regiões de nossa galáxia, onde a densidade é inferior a uma partícula por centímetro cúbico.

A Figura 1 mostra a representação espacial da molécula de CO. Da mesma forma que os elétrons, toda vez que uma molécula salta de um nível superior de energia para um nível inferior ela emite radiação. O pulo da molécula de CO do segundo para o primeiro nível de energia, gera radiação em comprimentos de onda de rádio, que tem a característica de se propagar nos meios mais variados sem sofrer muita interferência.

Na Figura 2 é mostrada a distribuição das nuvens moleculares na nossa galáxia como visto do Sistema Solar. Essas nuvens podem ser subdivididas em dois grandes grupos, que recebem o nome de **nuvens moleculares gigantes** e **nuvens escuras**. As nuvens moleculares gigantes têm massas maiores do que 10 milhões de massas solares e as nuvens escuras têm massas da ordem de até mil massas solares. Essas nuvens menores recebem essa denominação porque quando observadas em comprimentos de onda do visível, aparecem na Via Láctea como manchas escuras. Elas são escuras porque são nuvens próximas do Sistema Solar (distância típicas menores que 1200 anos-luz) e absorvem a radiação das estrelas que estão por trás delas. Os primeiros relatos científicos sobre a existência dessas nuvens foram escritos por William Hershel em 1780. No entanto, a sua hipótese para explicar as manchas escuras contra o fundo brilhante da Via Láctea, sugeria que se estava observando através de buracos na Galáxia. Um bom exemplo desse efeito é a nuvem escura conhecida como Saco de Carvão, que pode ser observada em uma noite de céu claro ao lado do Cruzeiro do Sul.

Diversas nuvens escuras podem ser vistas ao longo da Via Láctea em uma noite de céu limpo e sem Lua.

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DA MOLÉCULA DE CO.

Um grande número de nuvens moleculares foi identificado em nossa galáxia. Devido à sua grande variedade de formas (circulares, irregulares, filamentares etc), localização na Galáxia, temperaturas e densidades, elas têm sido classificadas em vários tipos diferentes que se distribuem entre as duas classes de nuvens definidas anteriormente.

FIGURA 2 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS NUVENS MOLECULARES NA GALÁXIA, DETERMINADA A PARTIR DE CONTAGEM DE ESTRELAS (CAMBRÉSY ET AL. 1999)

Um aspecto interessante é que apenas as nuvens moleculares gigantes formam estrelas de grande massa. As nuvens escuras, embora tenham massa até 100 vezes maiores do que as estrelas gigantes tipo O e B, não mostram qualquer evidência de que estrelas como essas estejam se formando em seu interior. Elas formam apenas estrelas de pequena massa.

Em nossa galáxia, as nuvens moleculares gigantes estão praticamente distribuídas em seus braços, razão pela qual, as maiorias das estrelas de grandes massas também estão nos braços.

5.4. COMO NASCEM AS ESTRELAS?

Apesar de se ter disponível, já no início da década de 80, uma grande quantidade de informação sobre as nuvens interestelares, e também terem sido observadas centenas de estrelas O e B jovens embebidas em nuvens moleculares, pouco se sabia dos estágios primordiais da formação das estrelas. Aqueles estágios em que as regiões mais densas

de uma nuvem, por algum motivo, colapsam sobre si mesmas produzindo temperaturas tão altas em seus núcleos, capazes de desencadear as reações nucleares necessárias para o nascimento de uma estrela.

Somente em 1986 é que foi finalmente estabelecido, com base em resultados observacionais, que as estrelas nascem em condensações de altas densidades em nuvens moleculares. Devido à sua aparência, na maioria das vezes circular essas condensações foram denominadas de Glóbulos. A primeira hipótese de que as estrelas nasciam nos glóbulos foi proposta por Baad em 1944. Três anos depois, ela foi bastante discutida por Bock e Reily (1947) e finalmente por Debai (1953), que apresentaram argumentos convincentes de que essa hipótese era verdadeira. Em homenagem a Bock, essas regiões passaram a ser denominadas Glóbulos de Bock.

Como esses glóbulos são regiões de altas densidades, eles sempre aparecem como objetos escuros quando observados em comprimentos de onda do visível. Mesmo uma estrela, que é um corpo celeste de alta temperatura e que emite muita radiação no visível, em seus estágios primordiais de formação não pode ser observada nesses comprimentos de onda. Isso porque o glóbulo progenitor absorve toda a radiação gerada pela estrela. Como mostra a figura 3, a estrela aquece o gás em sua vizinhança que por sua vez começa a emitir radiação como um corpo de baixa temperatura.

FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO AQUECIMENTO DA REGIÃO CENTRAL DE UM GLÓBULO POR UMA ESTRELA EM SEUS ESTÁGIOS PRIMORDIAIS.

5.4.1. EMISSÃO DE CORPOS DE BAIXAS TEMPERATURAS.

Um das principais características dos corpos com baixas temperaturas é que eles emitem radiação em comprimentos de onda grandes, ou seja, baixas freqüências. Essa propriedade dos corpos é muito bem descrita pela teoria de Planck. Os corpos com temperaturas superficiais muito altas emitem quase que toda sua radiação no intervalo de energia que vai do ultravioleta ao visível. Esse é o caso das estrelas gigantes azuis jovens, cujas temperaturas na superfície são superiores a 3 x 10^4 K. Todavia, nos estágios primordiais de formação estelar a maior parte da emissão proveniente dos glóbulos é produzida pelo gás e a poeira aquecidos a temperaturas de 10 a 100 K. Conseqüentemente, grande parte da energia desses corpos frios é emitida em

comprimentos de onda no infravermelho. Como a radiação nessas freqüências é absorvida pela atmosfera terrestre, exceto em algumas bandas muito estreitas (Ver Cap 2, Apostila), pode-se concluir que não seria fácil observar as estrelas recém-nascidas no interior dos glóbulos. É por esse motivo que as estrelas, em seus estágios primordiais de formação, só foram identificadas no interior dos glóbulos de Bock depois das observações do Satélite IRAS (InfraRed Astronomical Satellite) em comprimentos de onda do infravermelho (12 μm, 25 μm, 60 μm, 100 μm).

A figura 4 mostra a imagem de um glóbulo quando observado no visível, no infravermelho distante e através da emissão de uma variedade isotópica da molécula de monóxido de carbono. Observe que os máximos da emissão de $^{12}C^{18}O$ (J=1-0) ocorre exatamente na região onde o glóbulo praticamente não emite radiação no visível. O mesmo parece ocorrer com a emissão no infravermelho distante (100 μm), embora ele esteja um pouco deslocado para a borda do glóbulo no visível.

FIGURA 4 – IMAGENS ÓPTICA, INFRAVERMELHO E RÁDIO DO GLÓBULO COMETÁRIO VG33. A IMAGEM ÓPTICA É UMA COMPOSIÇÃO DE IMAGENS OBTIDAS EM HA E SII (REIPUTH, 1997) E A IMAGEM DE RADIO É A EMISSÃO DE $C^{18}O$ (HICKEL E VILAS-BOAS, 2001)

5.4.2. O COLAPSO DOS GLÓBULOS

Com base nos argumentos apresentados, é possível elaborar um quadro simplificado para entender os mecanismos responsáveis pelo colapso dos glóbulos e finalmente discutir quais os fatores que influenciam esse processo. Na tentativa de elaborar esse quadro e dele obter informações relevantes sobre a história do colapso, é necessário utilizar hipóteses de trabalho que simplifiquem a abordagem do problema e forneçam informações básicas sobre os mecanismos responsáveis pelo colapso.

Vamos imaginar um glóbulo esférico, com distribuição de massa uniforme, temperatura constante e destituído de movimento de rotação. Sabemos da teoria da Gravitação Universal de Newton, que os corpos se atraem com uma força que depende de suas massas e da distância entre elas. Essa é a força que atrai os corpos para o centro da Terra e que é responsável pela queda de todos eles. Se a superfície da Terra não fosse sólida, os corpos em queda livre poderiam chegar muito mais próximos do seu centro. Logo, como base apenas nessa experiência é possível dizer, fazendo uma perfeita analogia com a Terra, que todas as partes do glóbulo estão sendo atraídas para o seu centro. Como se trata de um objeto gasoso, todo o gás deve caminhar na direção do centro, a menos que algum outro fator impeça esse movimento. E isso realmente acontece quando as partículas em queda livre aproximam-se umas das outras a ponto de colidirem. As colisões fazem com que parte da energia cinética das partículas em queda se converta em calor, aumentando apreciavelmente a temperatura no centro do glóbulo. A conseqüência natural desse processo é o surgimento de uma força de dentro para fora, de modo semelhante ao que acontece com uma panela de pressão, podendo impedir o colapso das regiões centrais. Quanto mais gás cai para o centro do glóbulo, maior a temperatura central e maior a reação ao colapso.

Usando-se um pouco mais da nossa capacidade de abstração, seria possível incluir alguns outros elementos de nossa vida cotidiana nesse modelo. Sabemos que o glóbulo encontra-se em uma nuvem de gás mais extensa e de densidade menor. E o simples fato dele estar imerso nessa nuvem sugere que sua superfície pode sofrer a ação de uma pressão externa. Outro aspecto interessante resulta das observações de que no Sistema Solar os planetas e o próprio Sol, que é uma estrela de massa pequena, apresentam

movimento de rotação. Finalmente, um aspecto mais sutil está relacionado com o fato de que a Terra, o Sol e vários outros corpos celestes, inclusive a própria galáxia, têm campos magnéticos associados.

Dessa forma, é possível ampliar o modelo anterior levando-se em consideração esses aspectos. Uma representação esquemática está mostrada na figura 5. Em (A) é mostrada a física do problema e em (B) a sua representação matemática.

(B)

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{f} - \nabla P$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla . (\rho \vec{v}) = 0$$

$$\nabla^2 \Phi = -4\pi G \rho$$

$$\nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \frac{1}{4\pi} \nabla^2 \vec{B}$$

$$\vec{f} = -\rho \nabla \Phi - \frac{1}{8\pi} \nabla B^2 + \frac{1}{4\pi} (\vec{B} . \nabla) \vec{B}$$

FIGURA 5 – REPRESENTAÇÕES FÍSICA (5A) E MATEMÁTICA (5B) DA COMPETIÇÃO ENTRE OS MECANISMOS QUE PODEM INIBIR OU DESENCADEAR O COLAPSO DE UM GLÓBULO. EM (B) ESTÃO ESCRITAS AS EQUAÇÕES DA HIDRODINÂMICA QUE PODEM DESCREVER A EVOLUÇÃO DO COLAPSO DE UM GLÓBULO.

Como mostra a figura, o problema consiste de uma competição entre a atração **gravitacional (F_G)**, o **aquecimento interno (F_{PI})**, a **pressão externa (F_{PE})**, o **campo magnético (F_B)** e o **movimento de rotação (F_{ROT})**. O que pode ser escrito matematicamente como

$$(F_G + F_{PE}) = (F_B + F_{PI} + F_{ROT})$$

Na análise que é feita a seguir, apenas para simplificar o entendimento do problema, serão desprezados os efeitos da pressão externa e da rotação. Apenas no final do texto a rotação será considerada, com ênfase no seu papel para explicar porque algumas estrelas não giram com a velocidade esperada ou giram no sentido invertido.

5.4.2.1. MASSA CRÍTICA E TEMPO DE COLAPSO

Se a força gravitacional for maior do que a repulsão interna, o colapso será inevitável, resultando em uma estrela jovem. Se a repulsão interna for maior do que a atração, o glóbulo irá se desfazer. No entanto se a atração e a repulsão forem iguais o glóbulo não sofrerá qualquer alteração e permanecerá nesse estado de equilíbrio.

A partir das equações da cinemática de Newton,

$$V = V_0 + a\,t$$
$$V^2 = V_0^2 + 2\,a\,R$$
$$R = V_0\,t + \tfrac{1}{2}\,a\,t^2$$

Onde, **V** é a velocidade, $a = GM/R^2$ é a aceleração da gravidade, **R** é a distância ao centro do glóbulo, **M** a massa do glóbulo e **G** a constante de gravitação universal e assumindo que no centro do glóbulo a energia das partículas do gás em queda livre é convertida em temperatura ($\frac{1}{2}\,m\,v^2 = 1.5\,k\,T$), é possível mostrar que se a temperatura interna e a densidade de um glóbulo são **T** e ρ respectivamente, então existe uma massa crítica a partir da qual o glóbulo colapsa, dada por

$M_{CRIT} \alpha\ T^{3/2} / \rho^{1/2}$

Ainda usando essas equações simples da cinemática, é possível obter uma relação entre o tempo de colapso do glóbulo e sua densidade.

$t_{colapso} \alpha\ \rho^{-1/2}$

Esses resultados mostram que quanto maior a temperatura no centro dos glóbulos maiores serão as massas necessárias para desencadear o colapso. Outro aspecto interessante, é que, tanto maiores serão as densidade centrais quanto maiores forem às massas dos glóbulos. Logo, o colapso para formar estrelas de massas grandes (estrelas tipo O) ocorre numa escala de tempo menor do que as estrelas de massas pequenas (o nosso Sol).

Uma estimativa mais rigorosa da Massa Crítica, também denominada massa de Jeans, e do tempo de colapso pode ser feita a partir das equações da hidrodinâmica fornecidas na figura 5B. Para resolvê-la em primeira aproximação, usa-se o método das perturbações. Resultados similares aos obtidos anteriormente também são obtidos com esse procedimento bem mais rigoroso. Ele tem a vantagem de poder explorar em detalhes todo o processo do colapso, usando-se métodos computacionais.

5.4.2.2. QUAL O PAPEL DO CAMPO MAGNÉTICO NO COLAPSO?

Embora os glóbulos sejam densos e absorvam praticamente toda a radiação em suas camadas externas, algumas partículas de altas energias vindas do Cosmo (raios cósmicos) conseguem penetrá-los, ionizando uma pequena quantidade de matéria. Essa matéria ionizada é suficiente para mudar apreciavelmente a história do colapso. Isso porque as partículas carregadas sofrem uma influência muito forte do campo magnético. Quando as cargas em seu movimento de colapso cruzam perpendicularmente o campo, elas tendem a arrastá-lo. Isto não acontece quando elas seguem ao longo do campo.

Nessa direção, elas se movem sem sofrer qualquer interação com ele. É essa maneira diferente das partículas ionizadas interagirem com o campo magnético que acaba influenciando o quadro evolutivo do colapso. Uma situação interessante é aquela em que o campo é tão forte que ele se opõe ao movimento das partículas carregadas, inibindo completamente o colapso. Embora isso possa acontecer, o campo magnético apresenta um comportamento muito interessante: ao longo do tempo ele tende a voltar à configuração que ele tinha antes do início do colapso. Isso faz com que, transcorrido certo tempo (tempo de **difusão ambipolar**), o campo magnético deixe o glóbulo gradativamente, permitindo que as regiões centrais comecem a colapsar. Isto é, o núcleo do glóbulo entra em colapso primeiro e posteriormente as partes mais externas. Esse tipo de colapso cria uma região rarefeita entre o núcleo denso e a borda interna envelope de gás que continua caindo para o centro. Tudo se passa como se esse anel de rarefação estivesse se propagando de dentro para fora. Esse tipo de colapso é denominado **colapso de dentro para fora.**

O colapso que ocorre sem a ação de qualquer mecanismo externo, é denominado de ***colapso espontâneo***.

Na figura 6, é mostrada uma representação esquemática do problema. Em 6A é mostrada a nuvem molecular, o glóbulo e as linhas de campo magnético. Em 6B as linhas de campo estão distorcidas dentro dos glóbulos porque os íons que participam do colapso e se movem perpendicularmente ao campo magnético, arrastam o campo consigo. Observe que ao longo do campo o gás cai livremente, o que não acontece nas direções perpendiculares. Conseqüentemente, o que antes era uma esfera de gás se transforma em algo com a forma de disco, como mostram as figuras 6 B e C. Essa geometria também é favorecida pela rotação.

FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS ESTÁGIOS EVOLUTIVOS DO COLAPSO DE UM GLÓBULO. (A) REPRESENTA O ESTADO INICIAL DO COLAPSO. O GLÓBULO AINDA É ESFÉRICO E AS LINHAS DO CAMPO MAGNÉTICO SÃO PARALELAS. ISTO É, O CAMPO É UNIFORME. EM (B) O COLAPSO EVOLUIU E AS LINHAS DE CAMPO FORAM ARRASTADAS PELO GÁS EM QUEDA LIVRE E A GEOMETRIA DA NUVEM TENDE PARA UM DISCO (ELIPSÓIDE OBLATO). EM (C) O COLAPSO DO NÚCLEO JÁ OCORREU E UMA ESTRELA JOVEM ENCONTRA-SE NO CENTRO DO GLÓBULO.

5.4.2.3. QUAL O PAPEL DAS SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS?

Embora a composição química não pareça ter qualquer influência no colapso, ela realmente tem. Numa situação em que a temperatura interna do glóbulo gera uma pressão que estabelece o equilíbrio com a atração gravitacional, a presença das moléculas e átomos pode desequilibrar o sistema. Dentre essas moléculas, merecem destaque H_2O, CO, H_2 além de outras.

Como discutido anteriormente, a queda do gás para o centro da nuvem é o principal responsável pelo aquecimento do centro do glóbulo. Esse aquecimento resulta da

colisão entre as partículas do gás. Essas colisões fazem com que as moléculas ou átomos saltem para níveis de energia mais altos e posteriormente voltem para seus estados inicias. Nesse processo, elas emitem radiação que deixa a nuvem e se propaga em todas as direções, carregando uma pequena porção do calor interno do glóbulo. Em outras palavras, elas agem como refrigeradores do núcleo. Como muitas moléculas e átomos estão envolvidos nesse processo, uma fração apreciável do calor interno do glóbulo é jogada para fora, diminuindo sua temperatura interna. Consequentemente, também diminui a pressão interna do glóbulo e a força que equilibra a atração gravitacional. Quando a diminuição dessa força é suficientemente grande, todo o glóbulo inicia um novo colapso.

O colapso resulta em um grande aquecimento do centro do glóbulo. Esse aquecimento é tal que 4 átomos de hidrogênio se fundem dando origem a um átomo de **He**. Quando isso ocorre, por definição nasce uma estrela. A principal característica desse processo de fusão é que parte da massa dos 4 átomos de **H** se transforma em energia ($E=mc^2$), sendo esse um dos principais processos de produção de energia nas estrelas (Ver Cap 4 da Apostila) .

5.5. CONSEQUÊNCIAS DO NASCIMENTO DE UMA ESTRELA.

Como mencionado no item anterior, o colapso resulta em aquecimento do núcleo dos glóbulos e finalmente no nascimento de uma estrela. A principal característica de uma estrela é que ela é uma intensa fonte de radiação. Tanto mais intensa ela será quanto maior for a sua massa. Com base nessa informação, pode-se concluir que as estrelas tipo O (gigantes azuis com massas >10 Massas do Sol) são muito mais brilhantes do que estrelas como o Sol que é uma anã tipo G. Devido às altas temperaturas de suas superfícies (>30000 C) as estrelas de grande massa produzem radiação ($>10^{48}$ fótons ionizantes) com energia suficiente para dissociar completamente uma grande quantidade de gás em torno das estrelas recém-nascidas. Como as estrelas de massa pequena, como o nosso Sol, produzem pouca radiação com essas características, elas não são capazes de ionizar o gás em sua vizinhança a ponto de criar uma grande bolha de gás ionizado.

Levando-se em consideração apenas essa característica, é possível concluir que as primeiras evidências do nascimento de um "bebê" estrela variam em função de suas massas.

5.5.1. ESTRELAS MASSIVAS O E B (M DA ORDEM DE 10 MASSAS SOLARES)

Ao nascerem, as estrelas de grande massa (10 massas solares ou mais) criam em torno de si uma bolha de gás totalmente ionizado, inicialmente pequena, e que se expande continuamente criando uma onda de choque na região que delimita a bolha ionizada e o gás externo. Essa bolha pode se expandir consumindo completamente o glóbulo progenitor, podendo inclusive ionizar toda a nuvem de gás. Um aspecto interessante desse quadro evolutivo é que a frente de choque, propagando-se ao longo da nuvem, tem a propriedade de comprimir o gás que encontra em seu caminho. Se essa frente encontra um glóbulo, ela aumenta a pressão externa (F_{PE}) do ambiente onde ele se encontra. O aumento da pressão pode desequilibrar os glóbulos induzindo a formação de novas estrelas. Esse mecanismo parece ser um dos principais responsáveis pela formação de estrelas de grandes massas e tem sido amplamente utilizado para explicar associações de estrelas de grande massa que apresentam gradientes de idades. Ele é denominado de ***Formação Induzida*** ou ***Formação Seqüencial de Estrelas***.

A figura 7 (A) mostra o "bebê" estrela e a bolha de gás ionizado que se expande na direção do disco, bem como na direção perpendicular. Observe que a direção perpendicular é a direção do campo magnético. A expansão da bolha de gás ionizado ao longo do plano do disco é mais difícil do que na direção perpendicular. Isso porque a densidade do disco é muito alta e também porque o gás ionizado tem que se mover perpendicularmente ao campo magnético. Como se discutiu anteriormente, o campo magnético se opõe ao movimento de cargas elétricas nessa direção. Esse efeito tem menor importância quando a estrela é muito brilhante e a energia injetada no gás ionizado é muito alta. Embora o disco e o campo magnético ofereçam resistência à expansão dessa bolha de alta energia, ela acaba destruindo o disco e o próprio glóbulo.

E tudo isso numa escala de tempo muito curto ($<10^5$ anos). Embora essas estrelas, durante sua fase "pré-natal", estejam completamente embebidas em um "casulo" muito denso (glóbulo), elas anunciam a sua existência criando um forte jato de gás que escapa do núcleo do casulo na direção perpendicular ao disco. Uma vez que toda essa atividade pode ocorrer no período compreendido entre as "últimas semanas de gestação" e os primeiros dias de vida das estrelas, esses jatos podem ser vistos como o primeiro "choro" do bebê estrela.

FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS ESTÁGIOS POSTERIORES AO NASCIMENTO DAS ESTRELAS. EM (A) É MOSTRADA A BOLHA DE GÁS IONIZADO (REGIÃO HII COMPACTA) CRIADA POR UMA ESTRELA DE GRANDE MASSA (O,B) EXPANDINDO-SE AO LONGO DO DISCO E NAS DIREÇÕES PERPENDICULARES. A FRENTE DA BOLHA IONIZADA É MARCADA PELA PRESENÇA DE UM CHOQUE SUPERSÔNICO E UM INTENSO CAMPO DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA. EM (B) É

MOSTRADA A EVOLUÇÃO DA BOLHA DE GÁS AQUECIDO QUE SE FORMA EM TORNO DA ESTRELA DE MASSA PEQUENA. É MOSTRADA A INTERAÇÃO DO JATO PERPENDICULAR AO DISCO COM AS NUVENS MOLECULARES VIZINHAS.

5.5.2. ESTRELAS DE PEQUENA MASSA (M DA ORDEM DE 1 MASSA SOLAR)

As estrelas de pequena massa se formam de maneira similar às estrelas de grande massa. As principais diferenças no processo de formação de ambas estão relacionadas principalmente com seus estágios finais de "gestação". Enquanto as estrelas muito brilhantes, de grande massa, nascem e podem destruir completamente o glóbulo progenitor, as estrelas de massa pequena não. Por esse motivo, os efeitos do nascimento desse "bebê" estrela sobre o meio ficam determinados pelas características da própria estrela mais as condições impostas pelo meio em que ela se forma. Isto é, da mesma forma que uma estrela de grande massa, ela também cria uma bolha de gás aquecido que se expande em todas as direções. Todavia, no caso dessas estrelas, a expansão ao longo do disco se limita a certa distância da estrela central, preservando assim o disco e o ambiente externo. Na direção perpendicular, o gás aquecido de alta pressão escapa ao longo da direção do campo magnético formando um jato que vai interagir com a nuvem molecular ou o resto do glóbulo que não foi consumido nessa "gestação".

A principal característica da formação dessas estrelas é que elas preservam o disco de gás e poeira do qual se formam os sistemas planetários. É exatamente num sistema planetário como esse que se encontra a única forma de vida ***"inteligente"*** que se conhece.

Uma representação esquemática dos estágios primordiais de evolução dessas estrelas é mostrada na figura 7B.

Os estudos da atividade de formação de estrelas nas nuvens moleculares, realizados na última década, mostram que as estrelas de grande massa nascem apenas em nuvens

moleculares gigantes onde também se formam estrelas de pequena massa. Esse é o caso de nuvens moleculares como Orion e NGC6334. Por outro lado às nuvens moleculares escuras, que tem massas até mil vezes menores que as gigantes, forma apenas estrelas de pequena massa. Esse é o caso, por exemplo, das nuvens conhecidas como Cepheus, Taurus, Musca, Chamaeleon etc.

5.5.3. ROTAÇÃO DAS NUVENS.

As observações dos glóbulos mostram que eles têm rotações muito pequenas ou quase imperceptíveis.

Mesmo sendo pequena, essa rotação pode ter conseqüência muito importante na história evolutiva de um glóbulo. Por menor que seja esse movimento no início do colapso, caso em que a rotação é originária da própria rotação galáctica, ele acaba sendo importante nos estágios finais porque o colapso conserva o momento angular. Isto é, quanto menor for o raio do glóbulo colapsando, mais rápido ele gira.

Se o glóbulo gira mais rápido à medida que o colapso prossegue, o que deveria acontecer com o campo magnético se, de acordo com as discussões anteriores, ele é arrastado pelo gás?

Seria de se esperar que ele também fosse arrastado pelo movimento de rotação. Como conseqüência o campo tenderia a torcer sobre si mesmo. Como o campo se opõe a esse movimento, da mesma forma que ao colapso, a torção resulta na diminuição da velocidade de rotação do gás. Esse efeito é um dos mecanismos capazes de explicar porque a rotação de estrelas recém-formadas não conserva a energia de rotação das nuvens progenitoras. Devido a esse tipo de torção do campo, pode haver uma situação extrema em que o próprio sentido de giro da estrela pode ser invertido.

Na realidade, as observações de algumas estrelas jovens com massa idêntica à do Sol (estrelas T Tauri) mostram movimento de rotação contrário à rotação da sua nuvem progenitora com energia da rotação sempre menor do que a energia de rotação inicial

5.6. BIBLIOGRAFIA

Wynn-Williams, G. "The Fullness of Space". Cambridge University Press, 1992.

Taylor, S.R., "Solar System Evolution. A New Perspective". Cap 2. Cambridge University Press, 1992

Verschuur, G. L. "Interestellar Matters". Spring-Verlag, 1990.

Ronan, C. A. "História Ilustrada da Ciência". Jorge Zahar Editor Vols. I e II. 1991.

Proceedings of the International Conference "Star Formation 1999". Nagoya, Japan.
Obs: Material disponível via Internet.

Física –UFRGS, 1999.

Capítulo 6

A VIDA DAS ESTRELAS

Hugo Vicente Capelato*

* e-mail: hcapelato@gmail.com

ESTRELAS

LISTA DE FIGURAS....4

6.1. INTRODUÇÃO....6

6.2. A COR E O BRILHO DAS ESTRELAS....7

6.2.1. A SEQUÊNCIA PRINCIPAL DE ESTRELAS....9

6.2.2. ACIMA DA SEQUÊNCIA PRINCIPAL....10

6.2.3. ABAIXO DA SEQUÊNCIA PRINCIPAL....10

6.2.4. AS ESTRELAS VARIÁVEIS....11

6.3. O INTERIOR DAS ESTRELAS....12

6.3.1. AS ESFERAS DE GÁS QUENTE....12

6.3.2. POR QUE AS TEMPERATURAS SÃO TÃO ALTAS ?....14

6.3.3. CONVECÇÃO E ONDAS SONORAS NAS ESTRELAS....15

6.4. A GERAÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR NAS ESTRELAS....18

6.4.1. OS NÚCLEOS ATÔMICOS....19

6.4.2. FUSÃO OU FISSÃO ?....21

6.4.3. O EFEITO TÚNEL....22

6.4.4. INTERAÇÕES FRACAS....23

6.5. O NASCIMENTO DAS ESTRELAS....24

6.5.1. As Nuvens Interestelares: berçário das estrelas....24

6.5.2. Por que nascem as estrelas ?....25

6.5.3. A vida das proto-estrelas....26

6.6. Vida e morte das estrelas....27

6.6.1. A estrela esgota o seu reservatório de Hidrogênio....27

6.6.2. A velhice....28

6.6.3. Gigantes vermelhas e Anãs brancas....29

6.6.4. As Supernovas....30

6.6.5. Estrelas de neutrons e buracos negros....33

6.7. Bibliografia....34

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 5.1 - 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).....8

FIGURA 5.2.....14

FIGURA 5.3 - 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 !.....18

.....18

FIGURA 5.4 - 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).....20

.....25

FIGURA 5.5 - AS ESTRELAS DAS PLÊIADES NASCERAM APROXIMADAMENTE HÁ 60 MILHÕES DE ANOS ATRÁS E AINDA ESTÃO "VESTIDAS" COM OS RESTOS DE SUA NUVEM-MÃE.....25

FIGURA 5.6 - NEBULOSA PLANETÁRIA. 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.....30

.....30

FIGURA 5.7 - 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.....33

6.1. 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 adiante[1]. 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 distâncias 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).

6.2. 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 superfície[2], 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 5.1, onde cada ponto indica o brilho e a cor de uma determinada estrela. Um diagrama deste tipo é conhecido como diagrama de Hertzprung-Russel (HR).

O Sol tem uma cor intermediária amarelo-claro. A sua temperatura na superfície é de cerca de 5 800 K (graus Kelvin[3]). 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 brilho[4] 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 Figura 5.1 nós desenhamos também as linhas tracejadas que indicam os lugares onde

[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.

devem cair as estrelas de mesmo raio[5]: é fácil ver quão correto foi batizar de *Super-gigante* uma estrela como Betelgeuse.

FIGURA 5.1 - 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 radiação[6] emitida por segundo pela estrela. Uma parte desta radiação pode nem ser detectável pelos nossos 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

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

[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 *rádio* ou os *raios-X*.

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 5.1, o brilho das estrelas está expresso em termos da sua luminosidade, enquanto a cor está em termos da sua temperatura superficial.

6.2.1. A SEQUÊNCIA PRINCIPAL DE ESTRELAS

Quando examinamos como se distribuem os pontos correspondentes às estrelas no diagrama H-R (Figura 5.1), 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 0,1vezes a 10 vezes a massa do Sol[7], mas a maior parte tem massas da ordem de 0,8 $M_\odot$, ou pouco 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.

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

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.

6.2.2. 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.

6.2.3. 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 neutrons, e outras ainda transformam-se em buracos negros.

6.2.4. 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 média: 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.

6.3. O INTERIOR DAS ESTRELAS

6.3.1. 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 $60M_\odot$ da sequência principal dever ter então uma temperatura central da ordem de $60 \times T_{central\ do\ Sol} = 900 \times 10^6$ 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 estrela[8]. 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 5.2.
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 *press*iona 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:

Diferença de pressões = 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 *cresce* 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!

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

[9] Mais corretamente esta equação deveria ser escrita assim: $P_{int}*A_{int} - P_{ext}*A_{ext}$ = *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.

pressão interna - pressão externa =
= diferença de pressões =
= peso da camada

FIGURA 5.2

6.3.2. POR QUE AS TEMPERATURAS SÃO TÃO ALTAS ?

A densidade média de massa do Sol é cerca de 1,4 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 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

[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

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).

6.3.3. 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 gás[11]. Estes processos dificultam, ou mesmo bloqueiam, o fluxo da radiação em direção à superfície (como na Figura 5.3). 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

[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.

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, 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 5.3 - 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 !

6.4. 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.

6.4.1. 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 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

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

"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 5.4 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 5.4 - 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.

6.4.2. FUSÃO OU FISSÃO ?

Na verdade, é praticamente impossível dispor de núcleons livres como nas experiências imaginárias que fizemos na seção 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 5.4, 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 dispusermos 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 obtém 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 eqüivale 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 eqüivale 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 massa[13]. Segundo a famosa fórmula de Einstein, a equivalência da energia com a massa se expressa assim:

$$Energia = Massa \times c^2$$

[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 !

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 ?

6.4.3. 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 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

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

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.

6.4.4. 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 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 => D + e^+ + neutrino

H^2 + próton => He^3

He^3 + He^3 => He^4 + próton + próton

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

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

6.5. O NASCIMENTO DAS ESTRELAS

6.5.1. AS NUVENS 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 contém 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 5.5 abaixo (As

[16] uma partícula "inimiga" do nosso familiar elétron, o e^- : quando os dois se encontram eles se auto-aniquilam, produzindo radiação eletromagnética - radiação !

[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.

Plêiades são também conhecidas entre nós como os 7 "estrelos" 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 5.5 - AS ESTRELAS DAS PLÊIADES NASCERAM APROXIMADAMENTE HÁ 60 MILHÕES DE ANOS ATRÁS E AINDA ESTÃO "VESTIDAS" COM OS RESTOS DE SUA NUVEM-MÃE.

6.5.2. 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 inicio 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/cm^3,

correspondente a algumas dezenas de átomos por cm^3. 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 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.

6.5.3. 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

[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 cm^3 , 100 trilhões de vezes superior! Como elas são tão rarefeitas, sua opacidade é praticamente nula (mas, então, por que são escuras ?).

se aglutinando em pequenas pedrinhas de rocha meteorítica e gelo que mais tarde darão origem a meteoróides 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.

6.6. VIDA E MORTE DAS ESTRELAS

6.6.1. 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,

[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

ainda se mantém 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, aumentando a sua temperatura e densidade e liberando energia gravitacional[20], 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.

6.6.2. 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.

[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 !!!).

6.6.3. 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 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 ordem 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 5.6).

FIGURA 5.6 - NEBULOSA PLANETÁRIA. 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.

6.6.4. 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/cm^3, o Carbono e o Oxigênio passam a queimar progressivamente em Neônio, 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 (reveja a Figura 5.4 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 neutrons: 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 neutrons[21]. O caroço colapsado, desvestido do seu manto explodido, emerge agora como uma *estrela de neutrons* girando rapidamente. Esta explosão titânica, causada pela energia liberada na

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

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.

FIGURA 5.7 - 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.

6.6.5. 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/cm^3. Uma gotinha de matéria neutrônica pesaria na Terra milhões de toneladas. Uma estrela de neutrons possui campos magnéticos de 10^{12} 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.

6.7. BIBLIOGRAFIA

Harrison, E.R. **Cosmology - The Science of the Universe**, Cambridge, 1981, (com o meus agradecimentos: este texto inspirou boa parte destas notas).

Hartmann, W.K. **Astronomy: The Cosmic Journey**, Wadsworth Pubblishing, 1989.

Maciel, W. J. (editor) **Astronomia e Astrofísica** (texto de curso de extensão universitária do Depto. de Astronomia do Inst. Astronômico e Geofísico - USP), 1991.

Capítulo 7

ESTÁGIOS FINAIS DE ESTRELAS

Flavio D'Amico*

* e-mail: flavio.damico@inpe.br

ESTÁGIOS FINAIS DE ESTRELAS

7.1 INTRODUÇÃO 3

7.2 OBJETOS COMPACTOS 3

7.3 MATÉRIA EXTREMAMENTE DENSA 4

7.4 ANÃS BRANCAS 8

7.4.1 Variáveis Cataclísmicas 9

7.5 ESTRELAS DE NÊUTRONS 11

7.5.1 Pulsares 12

7.5.2 Binárias de raios-X 14

7.6 BURACOS NEGROS 17

7.6.1 Histórico 18

7.6.2 Detalhes Observacionais 19

7.7 CONCLUSÕES 19

7.8 BIBLIOGRAFIA 21

7.1. INTRODUÇÃO

Eu tenho que começar o meu Capítulo agradecendo ao Hugo, autor do Capítulo sobre estrelas. Nele, o Hugo deixou a dica de como me dirigir à vocês para apresentar os objetos compactos: objetos de 3ª idade!!! Deve ser a minha pouca experiência (comparada com a do Hugo) que não me permitiu pensar em um nome tão sugestivo.

Minha tarefa aqui é a de apresentar para vocês esses objetos que são frutos da evolução estelar. Esses objetos estelares de 3ª idade são os seguintes: anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros. No Capítulo sobre estrelas o Hugo já mencionou, inclusive, como estas 3 classes de estrelas se formam.

Eu creio que uma abordagem mais apropriada para os nossos objetivos aqui é a *observacional*. Portanto, ao invés de me preocupar com aspectos teóricos mais pormenorizados sobre esses objetos, eu vou procurar enfatizar o conhecimento que nós Astrofísicos adquirimos desses objetos a partir da *observação* dos mesmos. Mas é claro que uma introdução um pouco mais formal se faz necessária.

7.2. OBJETOS COMPACTOS

As estrelas de 3ª idade são conhecidas pelo nome de *objetos compactos*. Uma anã branca, por exemplo, tem o seu raio da ordem do raio da Terra, mas uma massa de ~ 1,4 $M_\odot$. Ou seja: uma anã branca típica é um objeto estelar com uma massa cerca de 40% maior do que a massa solar *compactada* em um volume 1 milhão de vezes menor do que o Sol!! Como isso é possível?? Pense, agora, em uma estrela de nêutrons, que tem uma massa (típica) da ordem de 1,4 $M_\odot$ e um raio de apenas 15 km!! Como é possível que um objeto estelar assim exista?? Anãs brancas e estrelas de nêutrons, assim, caracterizam-se por ter uma densidade média elevada e são chamados de *objetos compactos*, assim como os buracos negros.

Exercício 1 - Qual a densidade média de uma anã branca?

(estejam prevenidos que astrofísicos gostam de trabalhar usando unidades no sistema cgs!)

$$\rho = M/V = 1{,}4 \times 2 \times 10^{33}/(10^9)^3 \sim 3 \times 10^6 \text{ g cm}^{-3}$$

Exercício 2 - Qual a densidade média de uma estrela de nêutrons?

$$\rho = M/V = 1{,}4 \times 2 \times 10^{33}/(15 \times 10^5)^3 \sim 10^{15} \text{ g cm}^{-3}$$

Compare as densidades calculadas acima com a densidade da água, por exemplo.

Exercício 3 - Suponha que você retire, da superfície de uma anã branca, uma colherzinha com 1 cm^3 de matéria. Qual a massa que você acabou de retirar?

Já que sabemos a densidade média, fica fácil:

$$M = \rho V \sim 10^7 . 1 \sim 10^7 \text{ g} \sim 10 \text{ toneladas!}$$

Vamos passar essa resposta para algo mais mensurável: um elefante africano adulto pesa cerca de 6 toneladas. Assim essa colherzinha de material pesa tanto quanto 1,7 elefantes!!

Exercício 4 - Qual o valor da aceleração da gravidade *g* em uma estrela de nêutrons?

Vejamos (dessa vez eu vou usar o SI para as unidades):

$$g = G . M / R^2 = 6{,}7 \times 10^{-11} \times 1{,}4 \times 2{,}0 \times 10^{30} / (15 \times 10^3)^2 \sim 10^{12} \text{ m s}^{-2}$$

7.3. MATÉRIA EXTREMAMENTE DENSA

Vamos recordar, em três ou quatro frases, o que o Hugo nos mostrou sobre as estrelas, apontando para o que me interessa em descrever aqui. As estrelas queimam combustível nuclear, principalmente em sua região central, para gerar uma pressão de radiação (de dentro para fora) de maneira a contrabalançar o colapso gravitacional (de fora para dentro). Na maior parte de suas vidas as estrelas transformam Hidrogênio em Hélio. Quando esta fase acaba, as estrelas usam o "combustível" resultante para um novo ciclo que forneça a tão necessária pressão de radiação, que evita a morte da estrela (vou falar mais adiante sobre o termo "morte" que eu acabei de usar). Assim no novo ciclo (como o Hugo nos mostrou) a estrela transforma Hélio em Carbono. E assim sucessivamente: Carbono em Oxigênio, Oxigênio em Silício, etc.. Enquanto a queima de Hidrogênio e Hélio sustenta a estrela por grande parte de sua vida (como o Hugo nos mostrou), as queimas sucessivas são "rápidas": a queima de Carbono na região central demora alguns mil anos; a queima de Oxigênio demora apenas **1 ano**; a queima de Silício **apenas uma semana**!

Para que a estrela comece a queimar Hélio, a temperatura interna tem que aumentar: momentaneamente a pressão gravitacional vence a batalha, a estrela diminui de tamanho e a temperatura interna aumenta iniciando a queima de Hélio. Identicamente em relação aos outros ciclos: sempre a gravidade vence a batalha para aumentar a temperatura interna para que um novo ciclo de queima comece.

De acordo com o que eu descrevi acima surge, pelo menos, uma questão imediata: e se o aumento de temperatura não for suficiente para iniciar a queima do combustível armazenado? Se isso acontecer, como vimos, a estrela não é capaz de gerar pressão de radiação para conter o colapso gravitacional. Se ela não encontrar um outro mecanismo capaz de conter o colapso, a estrela morrerá. O termo "morte", que eu já usei duas vezes, é errôneo. Por isso eu agradeci ao Hugo no começo por me emprestar a frase "estrelas de 3ª idade". Nós veremos mais adiante que estes objetos compactos (estas nossas estrelas de 3ª idade) ainda produzem energia. Há, ainda, um detalhe muito importante (que o Hugo já chamou atenção): a fusão só é um processo exoenergético até núcleos mais leves do que o do Ferro. Ou seja, se o núcleo estelar for formado

exclusivamente por Ferro, não é mais possível para a estrela ganhar energia a partir da fusão nuclear.

Corrigindo, então, a minha afirmação acima: as estrelas que não atingem o limiar de temperatura necessário para iniciar um novo ciclo de queima nuclear poderão colapsar se não acharem um outro mecanismo físico que forneça uma pressão qualquer capaz de suportar o colapso gravitacional.

Exatamente neste ponto entra o assunto desta seção: a matéria extremante densa. A distância entre os elétrons e o núcleo de um átomo é muito grande. Uma boa imagem (para aqueles que conhecem) é o estádio do Maracanã na Cidade Maravilhosa: se, no Maracanã o núcleo do átomo estiver na marca do meio do campo, as órbitas do elétron estarão nas arquibancadas. Para aqueles que não conhecem o Maracanã, eu preciso ser mais específico: os diâmetros dos átomos, incluindo os *orbitais eletrônicos*, estão compreendidos entre 1 e 5 Å (1 Å equivale a 10^{-10} m) enquanto que o diâmetro dos núcleos dos átomos é da ordem de 10^{-4} Å. Em outras palavras, um átomo como um todo é, grosso modo, linearmente cerca de 10000 vezes maior do que um núcleo atômico. Fica claro que existe um grande vazio entre as órbitas eletrônicas e o núcleo. E se esse espaço vazio fosse diminuído, obrigando tanto os elétrons a se aproximarem mais uns dos outros como também os átomos? Bem, não é difícil aceitar que a densidade média da matéria aumentaria, como é o caso dos objetos compactos.

Pois é exatamente isso que acontece em uma anã branca. O colapso gravitacional é freado graças a pressão fornecida pelos elétrons. Como as distâncias médias entre os elétrons diminuem muito e como estes se repelem mutuamente, os elétrons adquirem velocidades altíssimas (relativísticas) gerando uma *pressão de degenerescência*: os elétrons são ditos *degenerados*. É esta pressão de degenerescência que dá origem (que sustenta contra o colapso gravitacional) a uma anã branca.

Percebam que, quase de maneira intuitiva (usando, também conhecimentos rudimentares de mecânica quântica), nós chegamos à conclusão de que uma classe de objeto astrofísico "sustentado" pela pressão de degenerescência deve existir. A observação das anãs brancas, assim, é um dos trunfos da teoria de evolução estelar, um dos pilares da astrofísica.

E o que acontece quando a pressão aumenta mais ainda? O que acontece com a estrutura nuclear? É neste momento que eu aproveito para chamar a atenção de vocês de uma coisa que se chama *interdisciplinaridade*. Nós sabemos, da física de partículas, alguns fatos interessantes.

Sabemos que quando a densidade aumenta muito, os núcleos desaparecem, ou seja: a energia de ligação dos núcleos diminui com o aumento da densidade. Assim, sob circunstâncias extremas de densidade, temos que prótons (p), nêutrons (n) e elétrons (e^-) estão livres. Sabe-se também que, com o aumento da densidade, há um aumento significativo na seção de choque da reação

$$p + e^- \rightarrow n + \nu$$

(ν é um neutrino). Ou seja, a reação acima é eficientíssima em um regime de altas densidades. Ou seja, quando a densidade é muito grande, nós temos um verdadeiro *mar de nêutrons*.

Estes são os argumentos teóricos que nos permitem imaginar a existência de *estrelas de nêutrons*. Neste tipo de objeto o colapso gravitacional é inibido devido à *pressão de degenerescência dos nêutrons*, de maneira semelhante ao caso das anãs brancas. Esse mar de nêutrons forma, basicamente, uma estrutura cristalina extremamente eficiente tanto para conter o colapso gravitacional quanto equipartir eficientemente a energia para toda a estrela, por exemplo, tornando a temperatura uniforme em toda a estrela rapidamente.

Algum leitor (ou leitora!) mais aguçado (a) e atento (a) já deve estar fazendo o raciocínio descrito a seguir. Em alguns casos, a pressão de degenerescência dos elétrons é capaz de conter o colapso gravitacional. Em outros casos, a pressão de degenerescência dos nêutrons é capaz de fazê-lo. E quando nem esta nem aquela forem suficientes para conter o colapso?

Neste caso, obviamente, o colapso gravitacional continua, indefinidamente. Nós temos a formação de um *buraco negro*, um objeto celeste no qual a densidade é infinita, uma das criaturas mais maravilhosas, sem dúvida, do zoológico cósmico.

Embora, obviamente, o processo de formação de anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros seja entendido hoje em dia com um detalhamento bem maior do que o

simples descrito acima, espero ter conseguido passar, quase intuitivamente, como se formam esses objetos. Vou desprezar aqui uma descrição mais rigorosa de quais estrelas transformar-se-ão, no final de suas vidas, em anãs brancas, ou estrelas de nêutrons ou buracos negros. De maneira geral, seguindo as últimas informações disponíveis na literatura, levando-se em consideração vários mecanismos complexos de perda de massa, pode-se dizer que estrelas acima de 8 $M_\odot$ terminarão suas vidas como estrelas de nêutrons **ou** buracos negros, enquanto que estrelas com massa inferior a 5 $M_\odot$ terminarão suas vidas como anãs brancas (Glendenning 2000).

7.4. ANÃS BRANCAS

Nós já vimos alguns detalhes de como as anãs brancas se formam, tanto aqui como no capítulo do Hugo. Eu só quero acrescentar mais alguns detalhes históricos ao que já foi discutido.

Desde 1915 a massa da estrela companheira de Sirius, Sirius B, já era conhecida como sendo da ordem de 0,75 — 0,95 $M_\odot$ (esta é, aliás, a anã branca mais bem estudada até hoje). Ficava claro que, com uma massa dessa ordem e com um raio da ordem de 10^9 cm, esta estrela não podia mais iniciar um novo ciclo de queima nuclear e que seu destino seria irradiar energia lentamente, esfriando sua temperatura (ver o capítulo do Hugo).

Em 1914 Walter Sydney Adams (nascido na Síria, mas radicado nos EUA, 1876-1956: Adams1915) mediu o desvio gravitacional (veja o capítulo do Francisco Jablonski) de várias linhas de Sirius B e pode determinar seu raio. Como a massa da estrela já era conhecida, ficou claro a existência de estrelas com densidades da ordem de 10^6 g cm^{-3}. Era, então, necessário explicar-se como uma estrela com uma densidade tão alta como essa podia existir. A reposta veio em 1926, quando Sir Ralph Fowler (inglês, 1899-1944: Fowler 1926), usando a recém proposta estatísitica de Fermi-Dirac, mostrou que a pressão de degenerescência dos elétrons poderia conter o colapso gravitacional nas anãs branca.

Um outro feito, este fantástico e histórico para a Astrofísica, aconteceu em 1930, quando Subrahmanyan Chandrassekhar (indiano, 1910-1995: Chandrasekhar 1931), usando agora já a teoria especial da relatividade, mostrou que uma anã branca tem uma máxima massa possível. Esta massa é da ordem de 1,4 $M_\odot$. Em homenagem ao seu descobridor, este limite máximo de massa em uma anã branca é conhecido como *Massa de Chandrassekhar*. Também neste trabalho, Chandrassekhar apontou as anãs brancas como o estágio final de evolução de estrelas de pequena massa.

Vale a pena transcrever aqui as palavras de Chandrasekhar, que foi laureado com o prêmio Nobel de Física em 1983 (a tradução é minha, a partir do texto em inglês de Shapiro e Teukolsky de 1983): "A história de vida de uma estrela de pequena massa

precisa ser essencialmente diferente da de uma estrela de grande massa. Para uma estrela de pequena massa o estágio de anã branca é um passo natural antes do caminho até a completa extinção. Uma estrela de grande massa não pode passar pelo estágio de anã branca, o que nos deixa margem para especularmos sobre outras possibilidades de evolução".

7.4.1. Variáveis Cataclísmicas

Seguindo a minha idéia de ressaltar os aspectos observacionais dos objetos compactos, descrevo rapidamente as variáveis cataclísmicas.

Quando presentes em sistemas binários, algumas anãs brancas podem receber matéria de uma estrela companheira. Esta estrela companheira, geralmente, é uma estrela da seqüência principal. Estes sistemas binários, com a presença de uma anã branca, são chamados de variáveis cataclísmicas (veja Figura 1). Estes sistemas são de **extrema** importância para a astrofísica, e uma descrição pormenorizada deles está totalmente fora do objetivo deste capítulo. No entanto, eu quero ressaltar a importância desses objetos por uma razão específica. Estes objetos são ótimos para que se estudem os chamados discos de acréscimo, ou, em um neologismo corriqueiramente usado, **discos de acresção**. Discos de acresção estão presentes em vários outros objetos astrofísicos e são as variáveis cataclísmicas que nos permitem saber e estudar a física desses discos detalhadamente. Não fosse a existência das variáveis cataclísmicas, provavelmente nós não poderíamos saber tantos detalhes sobre os discos.

Dependendo da intensidade do campo magnético da anã branca, as variáveis cataclísmicas são classificadas em várias classes, cada uma delas importante para se estudar o aspecto dos discos e também da transferência de matéria em sistemas binários.

FIGURA 1 - UMA REPRESENTAÇÃO ARTÍSTICA DE UMA VARIÁVEL CATACLÍSMICA. (Reprodução usada com a permissão do autor)

7.5. ESTRELAS DE NÊUTRONS

De todos os objetos compactos, as estrelas de nêutrons são a minha classe favorita por razões óbvias: grande parte do meu trabalho atualmente é dedicado a estudar sistemas binários contendo estrelas de nêutrons. Provavelmente, então a minha descrição aqui será mais rica do que no caso das anãs brancas, o que me obriga a pedir desculpas por este tratamento diferenciado.

A ideia de que estrelas de nêutrons existiam é relativamente antiga. Em um artigo em 1934, Walter Baade (nascido na Alemanha, mas radicado nos EUA, 1893-1960) e Fritz Zwicky (nascido na Suíça e também radicado nos EUA, 1898-1974) propuseram a existência das estrelas de nêutrons (Baade e Zwicky, 1934), objetos de maior densidade do que as anãs brancas. Neste artigo os autores também, podem dizer: *profetizaram* (já que nenhuma evidência existia na época) que estrelas de nêutrons nascem em explosões de supernovas (veja o capítulo do Hugo sobre estrelas). Em 1939 Robert Oppenheimer (americano, 1904-1967) e George Michael Volkoff (russo, 1914-2000) publicaram um artigo com os primeiros cálculos estruturais sobre uma estrela de neutrons (Oppenheimer e Volkoff, 1934). Outros trabalhos seguiram-se sobre o tema, mas as estrelas de nêutrons foram "deixadas de lado" pelo simples fato de que , com a

tecnologia disponível na época, elas não podiam ser observadas. Na década de 60, entretanto, duas descobertas fantásticas reavivaram o interesse em estudá-las: a descoberta da primeira fonte não solar de raios-X, Scorpius X-1 (ou Sco X-1) pelo italiano (laureado com o prêmio nobel de física de 2002) Riccardo Giacconi (nascido em 1931: Giacconi et al. 1962) e a, não-menos fascinante, descoberta do primeiro pulsar rádio por, na época uma jovem doutoranda, Jocelyn Bell (inglesa, nascida em 1943: Hewish et al. 1968). Ainda em 1968 duas descobertas também fantásticas: a do pulsar de Vela (Large, Vaughan e Mills 1968) e a do pulsar do Caranguejo (*Crab,* em inglês: Staelin e Reifenstein, 1968), ambos localizados em restos de supernovas, conforme a predição de Baade e Zwicky. Com a descoberta de Sco X-1 e dos pulsares de Vela e do *Crab* as estrelas de nêutrons entraram definitivamente no vocabulário corriqueiro da Astrofísica.

Para finalizar esta introdução eu quero chamar atenção para um detalhe observacional importantíssimo sobre as estrelas de nêutrons: elas têm uma máxima massa possível, ou seja, não é possível, para uma estrela de nêutrons, ter massa maior do que, aproximadamente, 3 $M_\odot$. Como esse limite superior de massa é derivado (e se ele é de 3 ou 2,5 ou 2,2 $M_\odot$) é uma questão que está fora dos objetivos deste Capítulo.

7.5.1. Pulsares

É interessante notar como o desenvolvimento teórico do nosso conhecimento sobre as estrelas de nêutrons está povoado de trabalhos *proféticos*! Foi assim também com o trabalho de Franco Pacini (italiano, nascido em 1939) em 1967 (Pacini, 1967). Pacini previu que uma estrela de nêutrons em rotação, cujo eixo do campo magnético (assumido dipolar) não coincida com o eixo de rotação, deve emitir uma intensa radiação pulsada, na faixa de rádio.

Quase imediatemante após essa previsão, como vimos, Jocelyn Bell descobriu o primeiro pulsar rádio. Hoje temos mais de 1200 pulsares conhecidos (ver Figura 2).

Pulsares rádio são extremamente importantes para a astronomia. O estudo detalhado desses sistemas nos fornece as melhores determinações para as massas das estrelas de nêutrons (ver Figura 4), um parâmetro importantíssimo para a física de partículas, já que, uma vez que o raio seja conhecido (admitamos que o raio de uma estrela de

nêutrons é da ordem de 15 km) com a determinação da massa nós podemos conhecer a densidade média das estrelas de nêutrons e, daí, elaborarmos modelos para o comportamento da matéria a altas densidades.

FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO (EM COORDENADAS GALÁCTICAS) DOS 1300 PULSARES CONHECIDOS (ATÉ FEVEREIRO DE 2004). DADOS OBTIDOS DE http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/

Os pulsares rádio também forneceram a melhor evidência (indireta) que dispomos até hoje da existência de ondas gravitacionais, previstas pela teoria geral da relatividade de Einstein. Estudando o sistema PSR B1913+16, Russel Hulse (americano, nascido em 1950) e Joseph Taylor (americano, nascido em 1941) puderam verificar que o tempo de chegada do pulso de um dos dois pulsares constituintes do sistema chegava sempre cada vez mais adiantado em relação ao observado anteriormente: em outras palavras, a diferença temporal entre a chegada de dois pulsos consecutivos é cada vez menor (Figura 3).

Esta diminuição temporal é totalmente compatível com um modelo que prevê que a emissão de ondas gravitacionais. Por este trabalho, Hulse e Taylor foram laureados com o Nobel de física em 1993.

7.5.2. Binárias de raios-X

Enquanto que nos pulsares a fonte de energia é a energia de rotação da estrela de nêutrons, nos pulsares de raios-X a fonte de energia é gravitacional.

Nos pulsares de raios-X uma estrela de nêutrons suga matéria de uma estrela companheira normal (geralmente uma estrela da seqüência principal), se esta estrela companheira está em certas etapas de seu estágio evolutivo. O mecanismo de transferência de matéria pode se dar através de ventos

FIGURA 3 - DIFERENÇA OBSERVADA ENTRE TEMPOS CONSECUTIVOS DE CHEGADA DOS PULSOS EM PSR B1913+16. A CURVA CHEIA MOSTRA O MODELO QUE EXPLICA ESTAS DIFERENÇAS COM AJUDA DA TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL.
FONTE: WEISBERG E TAYLOR, 2003.

estrelares ou por uma distorção esférica da estrela companheira (uma análise detalhada desses dois processos está fora dos objetivos deste texto). Por conservação de momento angular, em algumas situações, um *disco de acréscimo* é formado (analogamente ao caso das anãs brancas). Discos de acréscimo são uma excelente maneira de se emitir em

raios-X, faixa onde as binárias de raios-X são preferencialmente observadas. Reside exatamente aí a importância em se estudar esses sistemas, que são responsáveis pela emissão de parte dos fenômenos mais energéticos observados. Como se dá a produção de raios-X? Qual o espectro característico? Qual as regiões emissoras? Estas são algumas das (várias) linhas de pesquisa nesta classe de objetos .

Em algumas binárias de raios-X também é possível se fazerem determinação de massas. Embora com menos precisão do que no caso dos pulsares, estas determinações tem sua importância. Por exemplo (ver Figura 4) os sistemas binários denominados *Vela X-1* e *Cyg X-2* fornecem as únicas evidências experimentais de massas de estrelas de nêutrons que são maiores do que 1,5 $M_\odot$.

Vem também das binárias de raios-X as únicas determinações diretas de campos magnéticos em estrelas de nêutrons. Os valores obtidos fornecem campos da ordem de 10^{12} G, absolutamente concordantes com modelos de evolução estelar e com o que é estimado no caso dos pulsares rádio.

FIGURA 4. MASSAS DE ESTRELAS DE NÊUTRONS. OS CÍRCULOS SÃO SISTEMAS BINÁRIOS COM DUAS ESTRELAS DE NÊUTRONS; OS QUADRADOS SÃO SISTEMAS COM UMA ESTRELA DE NÊUTRONS E COM UMA ANÃ BRANCA; O LOSANGO É UM SISTEMA COM UMA ESTRELA DE NÊUTRONS E UMA ESTRELA DA SEQÜÊNCIA PRINCIPAL; TRIÂNGULOS E ASTERISCOS SÃO BINÁRIAS DE RAIOS-X. DADOS EXTRAÍDOS DE: THORSETT E CHAKRABARTY 1999, STAIRS ET AL. 2002, LYNE ET AL. 2004, SPLAVER ET AL. 2002, NAGASE 1989, ASH ET AL. 1999, QUAINTRELL ET AL. 2003, JONKER, VAN DER KLIS E GROOT 2003, NICE, SPLAVER E STAIRS 2004, OROSZ E KUULKERS 1999 E DE HTTP://WWW.JOHNSTONARCHIVE.NET/RELATIVITY/BINPULSETABLE.HTML

7.6. BURACOS NEGROS

Os buracos negros são, com certeza, os objetos astrofísicos que mais fascinam o publico leigo em Astrofísica. São objetos que cativam a curiosidade e a imaginação de todos que, um dia, ouviram falar de uma *estrela* tão densa que não deixa nem a luz escapar do seu potente campo gravitacional.

Como já vimos nas nossas seções anteriores sobre anãs brancas e estrelas de nêutrons, ambas têm uma máxima massa possível. O que acontece, então, com um objeto compacto que ultrapassa a maior massa permitida para uma estrela de nêutrons? A resposta, de acordo com a Teoria Geral da Relatividade, é de que nada impede o colapso. Com o procedimento gradual do colapso, o campo gravitacional perto do objeto torna-se cada vez mais intenso. Eventualmente, nada mais pode escapar do campo gravitacional do objeto para o mundo externo, nem mesmo a luz. Acaba de nascer um buraco negro. Toda a matéria está colapsada para o que chamamos de *singularidade*. Para podermos especular sobre fisica na reigão da singularidade, nós precisamos de uma teoria além da relatividade Geral. Esta teoria é a teoria quântica da gravitação que, efetivamente, não existe.

Exercício 5 - Expresse, dimensionalmente, uma fórmula para a densidade usando c, G e h. Qual o valor, em ordem de grandeza, da densidade obtida?

Eu nao vou resolver detalhadamente aqui, mas a fórmula seria algo como:

$$\rho \propto c^5 G^{-2} h^{-1} \sim 10^{93} \text{ g cm}^{-3},$$

ou seja, uma teoria quântica da gravitação tem que responder neste regime de densidades!!!!!

Um buraco negro é definido simplesmente como uma região do espaço-tempo que não pode se comunicar com o universo externo. A região que separa o buraco negro do universo exterior (a última região da qual podemos extrair alguma informação) é chamada de h*orizonte de eventos*.

7.6.1. Histórico

Ainda em 1795, Pierre-Simon Laplace (francês, 1749-1827: Laplace 1795) notou que, como conseqüência da teoria corpuscular da luz de Newton e também da gravitação Newtoniana, a luz não poderia escapar do campo gravitacional de um objeto com massa grande e com raio pequeno. Apesar desta idéia trazer a *lembrança* da existência de um buraco negro, ela foi esquecida, mesmo após a formulação da teoria geral da relatividade!

Em Dezembro de 1915, somente um mês após a publicação dos artigos de Einstein sobre a teoria geral da relatividade, Karl Schwarzschild (alemão, 1873-1916: Schwarzschild 1916) derivou a solução analítica para o comportamento do campo gravitacional nas vizinhanças de um corpo (suposto esférico), sem rotação. Existem várias histórias sobre esta solução de Schwarzschild. Uma delas diz que, supostamente, Einstein escreveu a Schwarzschild dizendo que não esperava que suas equações tivessem solução (??!!). Há, entretanto, um forte indício contra essa *estória* que é uma carta que Einstein escreveu a Schwarzschild dizendo que achara esplêndida a solução dada. Apesar disso, nenhum dos dois se deu conta que estavam em mãos com as equações que descreviam o comportamento de um buraco negro esférico, não-rotacional e eletricamente neutro. Hoje em dia nós nos referimos a estes tipos (hipotéticos, eu posso adiantar) de buracos negros como *buracos negros de Schwarzschild*, em sua homenagem.

Em 1930 Chandrassekhar descobriu o limite superior de massa para uma anã branca, como já vimos. Em 1962, também como vimos, os pulsares foram descobertos, confirmando a existência das estrelas de nêutrons. Rapidamente, todos trabalhos históricos sobre colapso gravitacional que envolvia a teoria geral da relatividade prevendo a existência dos buracos negros foram resgatados (por exemplo: Oppenheimer e Snyder 1939, Kerr 1963). Em 1968, John Archibald Wheeler (americano, nascido em 1911) cunhou o termo *buracos negros*.

7.6.2. Detalhes Observacionais

Como nós podemos ter tanta certeza da existência dos buracos negros? Eu acho que a resposta dessa pergunta tem duas partes. Isto é, deixo claro, uma visão pessoal.

Primeiro, a existência dos objetos compactos eu creio ser uma prova forte da existência dos buracos negros. Vimos que uma estrela tem a capacidade de conter o colapso gravitacional por pressão de degenerescência de elétrons ou nêutrons dando origem, estas, as estrelas de nêutrons e àquelas as anãs brancas. Vimos, também, que existe uma massa superior possível tanto para as estrelas de nêutrons quanto para as anãs brancas. Toda essa formulação entra na teoria da evolução estelar e todas as partes se encaixam, fazendo da teoria de formação estelar um dos pilares da Astrofísica. A idéia dos buracos negros surge da soma do colapso gravitacional de uma estrela massiva, resultado da teoria de evolução estelar, com a teoria da relatividade geral. Novamente, neste caso, tudo se encaixa perfeitamente.

Segundo, a Natureza nos deu a sorte de poder observar alguns objetos compactos em sistemas binários, como as binárias de raios-X que eu descrevi anteriormente. A observação de raios-X é um dos indícios (apenas indícios, prestem atenção!) da presença de um objeto compacto em um sistema binário.

O que acontece, então, quando nós medimos a massa de um objeto compacto e esta massa é maior do que 4 $M_\odot$? Como, à luz do que estudamos sobre os objetos compactos até agora, vocês caracterizariam este objeto? A meu ver, mesmo que não possamos ver um buraco negro, pela própria natureza intrínseca desses objetos, é o nosso conhecimento das anãs branca, das estrelas de nêutrons, da teoria de evolução estrelar e da teoria da relatividade geral que torna a existência dos buracos negros tão fácil de ser entendida, tão natural de ser aceita.

7.7. CONCLUSÕES

Com este Capítulo eu espero que vocês tenham tido uma introdução ao tema dos objetos compactos. Como eu já deixei claro várias vezes, uma abordagem profunda e mais pormenorizada foi, propositadamente, deixada de lado. Existem vários temas que eu não mencionei aqui como, por exemplo, a existência de buracos negros supermassivos e a existência de estrelas de nêutrons com campos magnéticos superiores a 10^{12} G.

Considerem, assim, este Capítulo como a sua primeira leitura, introdutória sobre o tema. Eu espero que sirva como referência para pesquisas e leituras futuras.

7.8. BIBLIOGRAFIA

Adams, W. S. 1915, PASP, 27, 236.

Baade, W., e Zwicky, F. 1934, Phys. Rev., 45, 138.

Chandrassekhar, S. 1931, ApJ, 74, 81.

Fowler, R. H. 1926, MNRAS, 87, 114.

Giacconi, R., Gursky, H., Paolini, F. R., Rossi, B. B. 1962, Phys. Rev. Lett., 9, 439

Glendenning, N. K. "Compact Stars: Nuclear Physics, Particle Physics and General Relativity (second edition)", Springer, 2000.

Heap, S. R., e Corcoran, M. F. 1992, ApJ, 387, 340.

Hewish, A., et al., 1968, Nature, 217, 709.

Jonker, P. G., van der Klis, M., e Groot, M. 2003. MNRAS, 339, 663.

Laplace, P. S. ''Le Système du Monde", Vol II, Paris (edição inglesa: "The System of the World", editado pela W. Flint de Londres, 1809), 1795.

Large, M. I., Vaughan, A. E., e Mills, B. Y. 1968, Nature, 220, 340.

Lyne, A. G., et al. 2004, Science, 303, 1153

Nagase, F. 1989, PASP, 41, 1.

Nice, D. J., Spaver, E. M., e Stairs I. H. Em "Young Neutron Stars and their environment (IAU Symp. Vol 218", F. Camilo e B. M. Gaensler (eds.), no prelo (ver astro-ph/0311296).

Oppenheimer, J. R., e Volkoff, G. M. 1939, Phys. Rev., 55, 374.

Orosz, J., e Kuulkers, E. 1999, MNRAS, 305, 132.

Pacini, F. 1967, Nature, 216, 567.

Reynolds, A. P., Bell, S. A., e Hilditch, R. W. 1992, MNRAS, 256, 631.

Schwarschild, K. 1916. *Sitzungsber. Dtsch. Akad. Wiss. Berlin, Kl. Math. Phys. Tech.*, p. 189 (texto original em alemão).

Shapiro, S. L., e Teukolsky, S. A. 1983 "Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars: the physics of compact objects", John Wiley & Sons, 1983.

Splaver, E. M. et al. 2002, ApJ, 581, 509.

Staelin, D. H., e Reifenstein, E. C. 1968, Science, 162, 1481.

Stairs, I. H. et al. 2002, ApJ, 581, 501.

Thorsett, S. E., e Chakrabarty, D. 1999, ApJ, 512, 1988.

Weisberg, J. M, e Taylor, J. H. 2003 em "Radio Pulsars". ASP Conference Proceedings, Vol. 302, M. Bailes, D. J. Nice , e S. E. Thorsett (eds). Astronomical Society of the Pacific Press, p.93.

Capítulo 8

GALÁXIAS

Carlos Alexandre Wuensche

Revisado em 2017

GALÁXIAS

LISTA DE FIGURAS 4

LISTA DE TABELAS 6

8.1. INTRODUÇÃO 7

8.2. A ESTRUTURA DA NOSSA GALÁXIA 8

8.3. AS FORMAS CONHECIDAS: ESPIRAIS, ELÍPTICAS E IRREGULARES 12

8.4. A FORMAÇÃO DAS GALÁXIAS 15

8.5. RADIOGALÁXIAS E QUASARES 17

8.6. A ESCALA DE DISTÂNCIA COSMOLÓGICA 25

8.6.1. HIERARQUIAS 26

8.6.2. DISTÂNCIAS TÍPICAS 28

8.7. REFERÊNCIAS 29

LISTA DE FIGURAS

Figura 8.1 – Vista representativa da estrutura da nossa Galáxia, com o disco representado em branco. O halo tem uma forma circular e circunda todo o disco. A distância do Sistema Solar ao centro da Galáxia está representada do lado esquerdo da figura inferior: ~ 30 mil anos luz (Ref: http://www.star.le.ac.uk/edu/mway). 7

Figura 8.2 – M45, um dos mais brilhantes e próximos aglomerados abertos conhecido. Também conhecido como Plêiades, ele contém cerca de 3000 estrelas e encontra-se a ~ 400 anos-luz da Terra. (Ref: http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod). 9

Figura 8.3 – Messier 80, um dos 147 aglomerados globulares conhecidos na Galáxia, localizado a 28,000 anos-luz da Terra, M80 contem centenas de milhares de estrelas, ligadas por sua atração gravitacional mútua (Ref: http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod)... 10

Figura 8.4 – Emissão de rádio no comprimento de onda de 21 cm, produzida por hidrogênio neutro, e usada para mapear os braços espirais da Via Láctea..... 11

Figura 8.5 – Mapa de emissão sincrotron feito por Haslam e colaboradores. A freqüência de observação é 408 MHz e o plano da Galáxia é a faixa escura, situada no centro do mapa. Nesse mapa não se observa estrelas individuais, mas radiofontes extensas e restos de supernovas (Ref: http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod)..... 12

Figura 8.6 – Galáxia elíptica E0, E3 e E0. Note-se o gradual aumento de excentricidade da esquerda para a direita. 14

Figura 8.7 – Galáxias espirais Sa, Sb e Sc, com a clara variação na forma e estrutura dos braços. Note-se a ausência, nessa foto, de espirais com barra..... 14

Figura 8.8 – Diagrama de Hubble para classificação de galáxias regulares (Fonte: Shu, pág. 294). 14

Figura 8.9 – Imagens de galáxias S0. Note a presença de uma barra no objeto à direita (Sb0). 15

Figura 8.10 – Da esquerda para a direita, Grande Nuvem e Pequena Nuvem de Magalhães. 15

Figura 8.11 – 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 (Ref. Adaptada de Seeds, 2000)..... 17

Figura 8.12 – Representação de um núcleo ativo de galáxia (AGN). O feixe perpendicular (acima e abaixo) ao disco são emissões de alta intensidade, causadas provavelmente pela aceleração de partículas pelo campo magnético do AGN. O objeto à direita é Centaurus A, o núcleo ativo de galáxia mais próximo. Cen A é uma galáxia elíptica gigante, localizada a cerca de 10 milhões de anos luz da Terra. A figura

combina uma imagem óptica com linhas escuras traçando os lobos de emissão em rádio (equivalentes aos jatos do desenho à esquerda) e uma imagem infravermelho superposta (em vermelho) feita pelo satélite ISSO 18

Figura 8.13 – 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 20

Figura 8.14 – 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) 21

Figura 8.15 – Posição das linhas de emissão do H observadas em quasares típicos. As linhas horizontais em $H_{\alpha,\beta,\gamma,\delta}$ representam a magnitude do deslocamento, em unidades de comprimento de onda. 22

Figura 8.16 – Regiões hospedeiras de quasares 23

Figura 8.17 – Imagens superpostas do quasar 3C 219. No centro encontramos a componente óptica, observado no óptico. Observe o jato fraco de matéria saindo da fonte (parte central da imagem). À mesma fonte medida em rádio mostra o forte jato, com o formato aproximado de um taco de beisebol na parte inferior direita da figura.. 24

Figura 8.18 – A distribuição de galáxias no Universo próximo feita pelo 2dF Survey (http://www.mso.anu.edu.au/2dFGRS) 27

LISTA DE TABELAS

TABELA 8. 1 – Diversos tipos de galáxias ativas e suas características principais 24

TABELA 8.2 – Escala do Universo conhecido (Adaptada de Ferris, pág. 225) 28

8.1. INTRODUÇÃO

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 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 na Figura 8.1.

Figura 8. 1 – Vista representativa da estrutura da nossa Galáxia, com o disco representado em branco. O halo tem uma forma circular e circunda todo o disco. A distância do Sistema Solar ao centro da Galáxia está representada do lado esquerdo da figura inferior: ~ 30 mil anos luz (Ref: http://www.star.le.ac.uk/edu/mway).

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 aproximadamente esférica que envolve o disco.

8.2. 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 sobre as estrelas, 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 das 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 esparso, cujas componentes estão ligeiramente ligadas pela gravidade. Exemplos clássicos de aglomerados abertos são as Plêiades (Figura 8.2) e as Híades (na constelação de Touro).

Figura 8.2 – M45, um dos mais brilhantes e próximos aglomerados abertos conhecido. Também conhecido como Plêiades, ele contém cerca de 3000 estrelas e encontra-se a ~ 400 anos-luz da Terra. (Ref: http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod).

Já os aglomerados globulares (Figura 8.3), 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. 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.

Figura 8.3 – Messier 80, um dos 147 aglomerados globulares conhecidos na Galáxia, localizado a 28,000 anos-luz da Terra, M80 contem centenas de milhares de estrelas, ligadas por sua atração gravitacional mútua (Ref: http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod).

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 percorridos ao longo do plano galáctico. Assim a radiação 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 sabemos então que ela tem a forma de uma espiral, com braços ao redor de um núcleo? Mapeamos a estrutura de "disco + halo", mencionada no começo dessa seção, utilizando a emissão rádio e infravermelho, cujos comprimentos de onda são pouco absorvidos, para traçar o contorno da Galáxia usando medidas nos braços espirais (Figura 8.4).

Figura 8.4 – Emissão de rádio no comprimento de onda de 21 cm, produzida por hidrogênio neutro, e usada para mapear os braços espirais da Via Láctea

A Figura 8.5 mostra um mapa de emissão sincrotron de todo o céu, com destaque para o plano da nossa Galáxia, feito na freqüência 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.

Figura 8.5 – Mapa de emissão sincrotron feito por Haslam e colaboradores. A freqüência de observação é 408 MHz e o plano da Galáxia é a faixa escura, situada no centro do mapa. Nesse mapa não se observa estrelas individuais, mas radiofontes extensas e restos de supernovas (Ref: http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod).

8.3. AS FORMAS CONHECIDAS: ESPIRAIS, ELÍPTICAS E IRREGULARES

A maior parte das galáxias possui características que permitem classificá-la 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 contém gás ou poeira, a matéria prima que permite a formação contínua de estrelas e 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 identificas pela letra E seguida de um número que define os diversos tipos de elípticas.

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. Já 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 e pequenos braços enrolados), Sb (núcleos menores e braços mais soltos) e Sc (núcleos bem pequenos e 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. Seu intervalo de massa e tamanho é bem menor que o notado nas elípticas, variando entre 100 e algumas centenas de bilhões de vezes a massa do Sol.

As Figuras 8.6 e 8.7 mostram fotos de galáxias elípticas e espirais. Nota-se claramente a diferença em suas estruturas. Entretanto, não se tem uma ideia 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. 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.

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 8.8). 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 (Figura 8.9). 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.

Figura 8.6 – Galáxia elíptica E0, E3 e E0. Note-se o gradual aumento de excentricidade da esquerda para a direita.

Figura 8.7 – Galáxias espirais Sa, Sb e Sc, com a clara variação na forma e estrutura dos braços. Note-se a ausência, nessa foto, de espirais com barra.

Figura 8.8 – Diagrama de Hubble para classificação de galáxias regulares (Fonte: Shu, pág. 294).

Figura 8.9 – Imagens de galáxias S0. Note a presença de uma barra no objeto à direita (Sb0).

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 (Figura 8.10).

Figura 8.10 – Da esquerda para a direita, Grande Nuvem e Pequena Nuvem de Magalhães.

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.

8.4. 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 10 a 11 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 $1x10^{24}$ átomos por centímetro cúbico), essa densidade ainda é cerca de um milhão de vezes maior do que a densidade do Universo hoje (cerca de 10^{-30} $g.cm^{-3}$). 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.

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 8.11 mostra como esse processo provavelmente ocorreu.

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.

8.5. 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.

Figura 8.11 – 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 (Ref. Adaptada de Seeds, 2000)

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 (Figura 8.12). Os elétrons possuem energias muito grandes, mas, paradoxalmente, os campos magnéticos que os aprisionam são muito mais fracos que o campo magnético terrestre.

Figura 8.12 – Representação de um núcleo ativo de galáxia (AGN). O feixe perpendicular (acima e abaixo) ao disco são emissões de alta intensidade, causadas provavelmente pela aceleração de partículas pelo campo magnético do AGN. O objeto à direita é Centaurus A, o núcleo ativo de galáxia mais próximo. Cen A é uma galáxia elíptica gigante, localizada a cerca de 10 milhões de anos luz da Terra. A figura combina uma imagem óptica com linhas escuras traçando os lobos de emissão em rádio (equivalentes aos jatos do desenho à esquerda) e uma imagem infravermelho superposta (em vermelho) feita pelo satélite ISSO.

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 8.13). Elas encontram-se separadas por centenas de milhares de anos luz e a radiogaláxia situa-se entre ambas as componentes. Freqüentemente 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).

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 Schimdt 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, a fonte tinha um desvio para o vermelho (ou "redshift") de 0,16 e estava se afastando de nós com uma velocidade de 16/100 da velocidade da luz. Nota-se, na Figura 8.14, 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.

Figura 8.13 – 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.

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 8.15).

Figura 8.14 – 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).

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 8.15 – Posição das linhas de emissão do H observadas em quasares típicos. As linhas horizontais em $H_{\alpha, \beta, \gamma, \delta}$ representam a magnitude do deslocamento, em unidades de comprimento de onda.

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, 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 (Figura 8.16). Possivelmente quasares e núcleos de radiogaláxias são o mesmo objeto, que se comporta de forma diferente ao longo de sua evolução.

Figura 8.16 – Regiões hospedeiras de quasares.

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 gigantescos 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 ativariam as regiões extensas mencionadas no começo dessa seção. A Tabela 8.1 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 8.17 mostra uma imagem do quasar 3C 219 no óptico e em rádio.

Figura 8.17 – Imagens superpostas do quasar 3C 219. No centro encontramos a componente óptica, observado no óptico. Observe o jato fraco de matéria saindo da fonte (parte central da imagem). À mesma fonte medida em rádio mostra o forte jato, com o formato aproximado de um taco de beisebol na parte inferior direita da figura.

TABELA 8. 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.

Segundo Fred Hoyle, um famoso astrônomo britânico, falecido em 2002, 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.

8.6. 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 que chega até nós. Historicamente, os modelos cosmológicos concebidos pelo Homem envolviam a Terra, a Lua, o Sol, os 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 ideia, acredita-se que inicialmente formulada por Emanuel Kant, 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 discussão, feita no capítulo sobre Cosmologia, 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. Estrelas 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.

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?

8.6.1. 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 aproximadamente 100 milhões de anos-luz). Encontramos uma espécie de parede de galáxias a uma distância de aproximadamente 450 milhões de anos-luz e, a partir daí, não existe

nenhuma evidência de outro nível na hierarquia de aglutinação da matéria (Figura 8.18). Aparentemente, ao tentar enxergar o Universo além de 450 milhões de anos-luz não encontramos nenhuma estrutura porque estamos olhando para uma região/época em que as galáxias ainda não haviam se formado. 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.

Figura 8.18 – A distribuição de galáxias no Universo próximo feita pelo 2dF Survey (http://www.mso.anu.edu.au/2dFGRS).

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 (já visto nas Figuras 8.6, 8.7 e 8.9). Localizado a cerca de 350 milhões de anos-luz, o aglomerado de Coma é o segundo mais próximo e contém alguns milhares de galáxias de todos os tipos já comentados. 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.

8.6.2. DISTÂNCIAS TÍPICAS

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 que nos mostra, em termos gerais, as relações de tamanho entre objetos no Universo que conhecemos:

TABELA 8.2 – 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
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 Astrofísica Extragaláctica e Cosmologia, trabalhamos com as maiores distâncias que um ser humano pode imaginar; algo entre 22 e 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 nosso Universo e será discutida em detalhes no capítulo sobre Cosmologia.

8.7. REFERÊNCIAS

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

1. "O despertar da Via Láctea". Thimothy Ferris. Ed. Campus, 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.

2. "A Brief History of Time". Stephen Hawking. 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.

3. "Shadows of Creation: Dark Matter and the Structure of the Universe". Michael Riordan e David Schramm. W. H. Freeman and Co., New York, 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.

4. "The Physical Universe". Frank Shu. University Science Books, 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. Revistas "Scientific American Brasil" e "Ciência Hoje". Existem diversos artigos ligados à formação do Universo e à interação entre galáxias. Vale a pena pesquisar.
6. "Foundations of Astronomy". Michael Seeds. Wadsworth Publising Co., 1997. Livro texto de introdução à astronomia, com textos claros e excelentes ilustrações. Um dos pontos altos do livro são as caixas de texto com questionamentos e as perguntas no final de cada capítulo.

Capítulo 9

Cosmologia

Carlos Alexandre Wuensche

Revisado em 2017

LISTA DE FIGURAS 4

9.1. INTRODUÇÃO 6

9.1.1 UMA PERSPECTIVA HISTÓRICA 6

9.1.2 O QUE É COSMOLOGIA? 8

9.2 O UNIVERSO OBSERVÁVEL 10

9.2.1 UMA VISÃO GERAL 11

9.2.2 LEI DE HUBBLE (OU A VELOCIDADE DE RECESSÃO DAS GALÁXIAS) 14

9.2.3 TESTES CINEMÁTICOS: RELAÇÕES LUMINOSIDADE X REDSHIFT E DISTÂNCIA ANGULAR X REDSHIFT 15

9.2.4 CONTAGEM DE GALÁXIAS 16

9.2.5 O ARCABOUÇO TÉORICO DE FRIEDMANN, LEMAITRE, ROBERTSON E WALKER 17

9.3 O UNIVERSO PRIMORDIAL 19

9.3.1 COMPOSIÇÃO 19

9.3.2 UMA BREVE HISTÓRIA TÉRMICA 20

9.3.3 INFLAÇÃO 22

9.3.4 NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL 24

9.3.5 A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO EM MICROONDAS 25

9.4 O UNIVERSO NÃO-HOMOGÊNEO 30

9.4.1 COLAPSO GRAVITACIONAL 31

9.4.2 FORMAÇÃO DE ESTRUTURAS 33

9.5 O SETOR ESCURO 40

9.5.1 MATÉRIA ESCURA 40

9.5.2 ENERGIA ESCURA 42

9.6 O UNIVERSO HOJE 44

9.6.1 A GEOMETRIA E EVOLUÇÃO DO UNIVERSO 46

9.6.2 O FUTURO DO UNIVERSO 48

9.7 CONCLUSÃO 49

9.8 REFERÊNCIAS 52

LISTA DE FIGURAS

Figura 9.1 – Espectro da radiação eletromagnética, de raios gama até ondas longas de rádio. A parte superior mostra a opacidade da atmosfera em função do comprimento de onda. A pequena banda colorida é a faixa óptica do espectro e, à esquerda estão localizadas as faixas do ultravioleta, raios-X e raios gama. Na parte inferior da figura, as regiões que absorvem radiação estão marcadas em marrom, com desenhos de satélites para observações fora da atmosfera e as duas bandas (óptico e rádio) observadas da superfície da Terra com telescópios. (Fonte: https://physics.stackexchange.com/questions/135260).....9

Figura 9.5 –À esquerda, o acoplamento causada pelo espalhamento Thomson obriga os fótons a percorrerem um caminho aleatório. Após a recombinação (à direita), os fótons podem ser propagar livremente pelo Universo. Fonte: http://universeadventure.org. 21

Figura 9.6 – Diagrama descritivo da história do Universo. Os números na parte inferior descrevem, respectivamente, o tempo (época) e a energia (temperatura) correspondentes a cada evento. Cada linha magenta representa um grande evento na história cósmica. Da esquerda para a direita: época da Grande Unificação (10^{-44} s); inflação (10^{-32} s); desacoplamento das forças eletrofraca e forte (10^{-10} s); nucleossíntese primordial (entre 10^{-2} s e 180 s); desacoplamento matéria-radiação (3 x 10^{5} anos); formação de estruturas (1 x 10^{9} anos); época atual (12 x 10^{9} anos). Fonte: Particle Data Group, LBNL (2008).....22

Figura 9.7 – Abundância relativa dos elementos leves em relação ao Hidrogênio. A linha vermelha central define os valores para cada um dos elementos, estimado a partir de medidas do satélite WMAP, considerando que a descrição do Universo concorda com o MCP (Fonte: https://map.gsfc.nasa.gov/).....25

Figura 9.8 – Espectro de corpo negro teórico com T = 2,726 K, superposto a medidas feitas por diferentes instrumentos no solo, a bordo de balão, a bordo de foguete e a bordo do satélite COBE. O pico encontra-se próximo da freqüência de 200 GHz. A escala de intensidade no eixo Y é de intensidade por ângulo sólido por frequência. Fonte: https://inspirehep.net/record/1295471/plots. 27

Figura 9.9 – Comparação entre os mapas das flutuações de temperatura feitos pelos três satélites dedicados a medir a RCFM. As manchas azuis (mais frias) e vermelhas (mais quentes) correspondem às flutuações de temperatura no Universo jovem. Deve-se notar o aumento de qualidade dos mapas, correspondentes à melhor resolução dos detectores. Fonte: http://slideplayer.com/slide/10583101. 28

Figura 9.10 – Espectro de potência angular das flutuações de temperatura da RCFM. Em destaque encontram-se os picos acústicos, causados por diferentes processos físicos antes e durante o período da recombinação. Fonte: Autoria própria.....29

Figura 9.18 – Distribuição das galáxias com $z \leq 1$ (~2 milhões de anos luz), no Hemisfério Sul, medidas pelo 6dF Galaxy Redshift Survey. O mapa contém 136.304 galáxias e mostra, claramente, a distribuição de estruturas no Universo próximo e uma rarefação à medida que o *redshift* aumenta, na direção das bordas da esfera. Fonte: http://www.mso.anu.edu.au/2dFGRS/.....39

Figura 9.19 – Foto do levantamento de galáxias 2MASS (2 Micron All Sky Survey) contendo cerca de 1,6 milhões de galáxias em todo o céu. As galáxias mais brilhantes e mais próximas são representadas em azul, e as mais fracas, as mais distantes estão em vermelho. A faixa escura nesta imagem mostra a área do céu onde a nossa Via Láctea galáctica bloqueia a nossa visão de objetos distantes, que, nesta projeção, situa-se predominantemente ao longo das bordas da imagem. (Fonte: IPAC/Caltech). 39

Figura 9.20 – Curva de velocidade radial da nossa Galáxia, uma espiral. A curva azul é a combinação das curvas de disco, gás e halo e esperava-se que ela decrescesse para raios maiores que 20 ou 30 kpc, conforme a curva vermelha, de acordo com as leis de Newton (Fonte: http://astro.if.ufrgs.br). 41

Figura 9.21 – Curva de velocidade radial da nossa Galáxia espiral. Acredita-se que a diferença entre as curvas é causada pela presença de matéria escura (Fonte: http://astro.if.ufrgs.br).....42

Figura 9.22 – Diagrama de fluxo (m-M) x distância para supernovas tipo I observadas pelos grupos de Perlmutter e Riess. O painel inferior mostra a diferença entre os dados e as previsões de modelo com Λ=0 e Ω_M= 0,3. Fonte: http://www.cfa.harvard.edu/oir/Research/supernova/HighZ.html.....44

Figura 9.23– Distribuição percentual dos componentes de matéria e energia no Universo.....45

Figura 9.24 – Comparação das diferentes geometrias no Universo (aberta, plana e fechada) e seu efeito na distribuição angular de temperaturas da RCFM. 47

9.1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas temos percebido um aumento rápido no conhecimento sobre a nossa vizinhança cósmica e, com as observações de objetos cada vez 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 estrelas pelos céus, da formação de sistemas planetários próximos ao nosso próprio sistema solar à descoberta que moléculas essenciais para a formação da vida encontram-se espalhadas por toda a nossa Galáxia e outras galáxias.

Nossa percepção de mundo e, quiçá, do futuro da humanidade sobre a Terra, será fortemente influenciado pela apreciação e entendimento dos processos físicos que ocorrem no Universo. Nesse capítulo faremos um breve resumo da História da Cosmologia e apresentaremos uma visão da Cosmologia dentro do paradigma observacional que permite formular um modelo mais consistente de Universo: o chamado **Modelo Cosmológico Padrão (MCP), ou Ω-CDM**. Discutiremos os constituintes do Universo, os principais pontos relacionados com sua origens e evolução. Finalizaremos este capítulo com uma breve discussão sobre o futuro do Universo.

9.1.1 UMA PERSPECTIVA HISTÓRICA

As origens históricas de uma visão cosmológica do Universo estão diretamente ligadas aos conceitos míticos que povoaram as religiões dos povos antigos. Como as fronteiras do "mundo conhecido" eram praticamente desconhecidas, cada civilização associava 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 Ser humano vivia.

Durante boa parte do curso da História, a associação de corpos errantes no céu com divindades nos remete diretamente ao conceito de magia, que hoje pode ser vista como uma tentativa de manipular a influência do Ser humano no mundo natural. Nessa época vivíamos num mundo de relacionamentos e afinidades, cujo pretenso controle era feito por sacerdotes e magos, com o objetivo de tentar compreender e dominar as forças da natureza.

Nesse sentido, enquanto "experimentador de técnicas mágicas", o sacerdote 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 humanas a respeito do Cosmos e o desenvolvimento de suas ideias sobre a natureza serviram como um fio que guiou a

espécie humana através do labirinto de diferenças culturais em várias civilizações e ao longo do tempo. Essas crenças agiram também como um espelho, refletindo a visão científica de sua época.

A cosmologia na Idade Antiga pode ser bem representada pela astronomia egípcia e mesopotâmica e seu apogeu ocorreu no florescer da Grécia Clássica. A civilização grega clássica (600 a.C.) foi a sociedade antiga que mais avançou em Astronomia e em outras áreas do conhecimento humano como filosofia, matemática e artes. Ao mesmo tempo, a mitologia grega era bem criativa. Essa civilização foi bastante influenciada pelos antigos egípcios e babilônios, tanto na área mitológica como na científica. A cosmologia grega, por exemplo, foi uma fusão evoluída das idéias egípcias, fenícias, mesopotâmias, minoanas e micênicas. Muitos filósofos, pensadores e cientistas gregos contribuíram para o crescimento da astronomia.

A civilização árabe deu continuidade à busca do conhecimento científico e à evolução cultural proporcionados pelos antigos gregos. Foram os árabes que nomearam boa parte das estrelas e constelações com o nome que conhecemos hoje. Por outro lado, durante a Idade Média (de 800 a 1450 d.C.), a evolução do pensamento científico na civilização ocidental foi praticamente inexistente. O modelo de Ptolomeu (Universo Geocêntrico) transformou-se em dogma adotado pela religião cristã e, em conseqüência, pela civilização cristã. Era conveniente e alinhado com o pensamento eclesiástico da época admitir a Terra como centro do Universo. No séc. XV, o filósofo e astrônomo germânico Nicolau de Cusa (1401 – 1464) sugeriu, em seus trabalhos, imaginou que a Terra não era o centro do Universo propondo que a mesma girava em torno de seu eixo e imaginou que as estrelas fossem outros sóis situados a distâncias diferentes num espaço infinito.

Entretanto, somente com o Renascimento Europeu, associado ao período das grandes viagens de navegação, a Ciência Ocidental retomou seu crescimento. O início da revolução astronômica veio com a introdução do sistema heliocêntrico para o Universo, proposto por Nicolau Copérnico (1473 – 1543) e a visão de Universo de Giordano Bruno (1548 – 1600), seguido pela utilização do telescópio por Galileu Galileu (1564 – 1642) e pela descoberta das leis que levam o nome do astrônomo Johannes Kepler (1571 – 1630), entre os sécs. XV e XVII. A partir desses três marcos e das descobertas científicas de Isaac Newton (1643 – 1727), no séc. XVIII, a Astronomia começou a evoluir de forma quantitativa, separando-se cada vez mais da astrologia e marcando o início da chamada ciência moderna. 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. Partiremos dessa época para nossa abordagem cosmológica.

9.1.2 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 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 tomamos emprestadas 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.

O estudo da cosmologia está intimamente ligado a uma teoria de gravitação, uma vez que a força que atua em escalas astronômicas e cosmológicas é a força gravitacional, uma das quatro forças conhecidas (além da gravitacional, as forças eletromagnética, nuclear forte e nuclear fraca). A principal teoria de gravitação utilizada na descrição do Universo em escalas muito grandes – maiores do que os aglomerados e super-aglomerados de galáxias – é a **Teoria da Relatividade Geral** (TRG), proposta por Albert Einstein (1879 – 1955). Ela veio substituir a **Teoria Clássica da Gravitação** proposta por Isaac Newton e, em linhas gerais, descreve como a matéria molda o espaço-tempo em que está inserida, ao mesmo tempo em que o espaço-tempo define as propriedades de dinâmicas (isto é, de movimento) da matéria. Ela será brevemente descrita na Seção 9.3.1. Algumas variantes da TRG existentes hoje serão também rapidamente abordadas.

Ao observar o céu, o ser humano pode "definir" o tamanho do seu Universo (no jargão astronômico, o "Universo observável", muito menor do que o Universo inteiro) em função das limitações dos instrumentos disponíveis e, consequentemente, da região acessível a seus instrumentos. Isso não quer dizer que não existam fenômenos além das regiões que conseguimos ver. Nosso universo tem as fronteiras tecnológicas (que vão sendo superadas à medida que inventamos instrumentos mais sensíveis) e as impostas pelas leis físicas. Nesse caso estamos limitados pela velocidade com que a informação transportada pela radiação eletromagnética (que pode ser luz, ondas de rádio, raios X e radiação medida em outros comprimentos de onda) se propaga. Assim, é possível

estender o raciocínio e imaginar que existem fenômenos astronômicos que já aconteceram, mas cujo 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 da absorção da radiação eletromagnética incidente, em quase todo o espectro eletromagnético, pela atmosfera da Terra. As únicas "janelas" visíveis do solo estão nas faixas óptica e rádio do espectro. A Figura 9.1 apresenta um diagrama que relaciona os comprimentos de onda com o mecanismo de absorção dentro da atmosfera. Estudando a radiação eletromagnética emitida por objetos celestes, podemos estimar a que distância eles se encontram, mapear o Universo e, em última instância, procurar respostas para algumas perguntas fundamentais formuladas pelo ser humano desde que este começou a olhar para o céu... Em última instância, sempre estaremos questionando nossas origens: quem somos? De onde viemos? Para onde vamos?

Figura 9.1 – Espectro da radiação eletromagnética, de raios gama até ondas longas de rádio. A parte superior mostra a opacidade da atmosfera em função do comprimento de onda. A pequena banda colorida é a faixa óptica do espectro e, à esquerda estão localizadas as faixas do ultravioleta, raios-X e raios gama. Na parte inferior da figura, as regiões que absorvem radiação estão marcadas em marrom, com desenhos de satélites para observações fora da atmosfera e as duas bandas (óptico e rádio) observadas da superfície da Terra com telescópios. (Fonte: https://physics.stackexchange.com/questions/135260)

Contudo, a motivação recente para o estudo da Cosmologia vem de questões em aberto na física e na astronomia, tais como:

- Como o Universo foi criado? Como ele terminará?
- Como as estruturas de matéria em grande escala se formaram?

- Qual o tamanho e a geometria do Universo?
- Qual é a composição química do Universo?
- O que são a matéria e a energia escura?
- Como descrever os fenômenos do Universo primordial através do modelo padrão da Física de Partículas?
- Porque o Universo está acelerando?
- Qual será o destino do Universo?

A pesquisa fundamental em Cosmologia envolve técnicas e instrumentação extremamente sofisticadas, muitas vezes desenvolvidas 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 tão extremas que jamais poderão ser conseguidas na Terra, de modo que a Cosmologia associa-se à Física para utilizar o Universo como um grande laboratório. Nas palavras de Yacob B. Zel'dovich (1914 – 1987) "O Universo é o acelerador de partículas dos pobres". Nos primeiros momentos do Universo, em que as energias são extremamente altas, a melhor descrição física é obtida com os conceitos da Física de Partículas. Fenômenos como o desacoplamento das forças eletrofraca e nuclear forte da força gravitacional, um possível momento em que houve a **Grande Unificação**, com as quatro forças sendo descritas por uma única teoria e a própria nucleossíntese primordial, quando foram formados os primeiros átomos de Deutério e Hélio, logo após os quarks livres serem confinados nos hádrons que constituem prótons e nêutrons, estão no âmbito da Física de Partículas, e o Universo pode, de fato, ser considerado como o "grande acelerador de partículas".

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 ideias do ser humano e fornecendo parâmetros para nortear escolhas que podem definir o futuro da nossa espécie. Sob esse aspecto, a Física, a Astronomia e a Cosmologia não geram conhecimento supérfluo e irrelevante – sua importância é vital.

9.2 O UNIVERSO OBSERVÁVEL

O objetivo final da Cosmologia é explicar o Universo em termos de uma teoria simples e esteticamente atraente. Entretanto, de todas as ciências, a Cosmologia 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. Além disso, ao contrário de um experimento em laboratório, não podemos criar (ou não existem) vários universos para que possamos fazer uma análise estatística completa de suas propriedades. Nessa seção serão discutidos alguns dos testes e observáveis usados para mapear a escala de distância cósmica

Ao estudarmos a distribuição de matéria no Universo, da forma apresentada neste curso, 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, até um limite em que o Universo torna-se homogêneo, isto é, sem estruturas aparentes.

A teoria mais aceita no momento é que o Universo foi criado a partir de um estado inicial muito denso e quente, com fótons com energias inimagináveis e pares de partículas sendo criados e aniquilados a cada instante. Deixamos para a reflexão do leitor a questão de como o Universo "se organizou", aparentemente violando a Segunda Lei da Termodinâmica?

9.2.1 UMA VISÃO GERAL

Nossa descrição do Universo primordial baseia-se mais nos cálculos e no conhecimento que temos sobre as leis da Física. As escalas de distância cobertas pelos telescópios ópticos e radiotelescópios vão até cerca de 13 bilhões de anos luz, ou praticamente a borda do Universo, já que estimamos que ele tenha cerca de 13,9 bilhões de anos. A última medida direta de um observável astronômico é a Radiação Cósmica de Fundo em Microondas (doravante RCFM), com praticamente 13,9 bilhões de anos, e situada em z ~ 1100. Os outros observáveis, tais como neutrinos primordiais e os primeiros núcleos de elementos (H, He, D, Li) somente podem ser estimados de forma indireta.

Temos um bom conhecimento sobre o Universo mais jovem, entre cerca de 10^{-6} s e ~ 380 mil anos de idade. Esse período é explorado a partir das informações que extraímos do estudo da RCFM, descoberta por Arno Penzias (1933 –) e Robert Wilson (1936 –) em 1964, e da sua associação com o estado primordial denso e quente mencionado anteriormente.

As galáxias mais próximas são brilhantes e permitem um estudo mais detalhado de suas propriedades. À medida que observamos objetos mais e mais distantes, a quantidade de radiação que recebemos é cada vez menor e, por essa razão, astrônomos sempre estão desenvolvendo instrumentos mais sofisticados. Olhando "mais fundo" no Universo, os astrônomos tentam conhecer mais detalhes sobre a época de nascimento das galáxias,

sua distribuição no espaço e sua evolução. Essa distribuição é conhecida como **Estrutura em Grande Escala (Figura 9.2)**.

O *redshift* (do inglês, deslocamento para o vermelho) é uma propriedade observada nas linhas espectrais das galáxias, que são deslocadas para maiores comprimentos de onda, na direção da parte vermelha do espectro eletromagnético (região de menor energia). A variação da freqüência em função do movimento do corpo emissor é conhecida como efeito Doppler a a variação é tanto maior quanto mais distante estiver a galáxia observada. O mapa apresentado na **Figura 9.2** é baseado nas medidas de *redshift* das galáxias e aglomerados.

Figura 9.2 – Levantamento de galáxias 2MASS, distribuídas em função do *redshift*, com cerca de 1,6 milhões de galáxias. A faixa brilhante no centro é a Via Láctea, onde estamos localizados. feito pela equipe do Center for Astrophysics (CfA) nas décadas de 70 e 80. O centro da figura representa o observador, ou seja, nós. Os números entre parênteses representam a distância em unidades de megaparsecs[1] ou, quando somente um número, o *redshift*. Os pontos mais distantes estão representados em vermelho e estão um *redshift* ~ 1,0. Muitas galáxias estão ligadas pela atração gravitacional, formando aglomerados que, por sua vez, se agrupam em super aglomerados e em estruturas ainda maiores. Fonte: IPAC/Caltech (https://apod.nasa.gov/apod/image/0712/lss_2mass_big.jpg).

Não sabemos exatamente em que época começou o processo de formação dessas estruturas, porque temos muito pouca informação sobre esse período do Universo, mas sabemos que isso deve ter acontecido quando o Universo tinha entre 100 milhões e 200

[1] 1 parsec (pc) = 3,26 anos luz = 3,09 x 10^{13} km, logo 1 Megaparsec (Mpc) = 10^6 pc = 3,09 x 10^{19} km.

milhões de anos de idade, conforme dados obtidos pelos satélites Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) e Planck, lançados, respectivamente, em 2001 e 2009.

A partir do início da década de 90, a combinação dos resultados de medidas da RCFM com observações da distribuição de galáxias e aglomerados de galáxias, descritos com o arcabouço da TRG, possibilitaram a criação de um paradigma de modelo cosmológico, conhecido como **Modelo Cosmológico Padrão** (doravante MCP). Ele é baseado na métrica de Robertson-Walker, nas equações de Friedmann e em observações que dão a sustentação para o MCP. Apesar de ainda deixar uma série de perguntas sem resposta, este modelo é o que melhor descreve o Universo que observamos e é baseado 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 Princípio Cosmológico;
- O Universo é homogêneo e isotrópico em escalas suficientemente grandes;
- A existência e as propriedades da RCFM, a abundância de determinados elementos químicos leves (Hidrogênio, deutério, Hélio e Lítio), a observação da velocidade relativa de afastamento de galáxias distantes e a expansão acelerada do Universo são observações que sustentam o arcabouço teórico do MCP.

O item 1 foi enunciado por Nicolau Copérnico em fins do século XV e vem sendo utilizado na 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 na nossa Galáxia são as mesmas em qualquer parte do Universo. Essa crença vem 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 galáxias, ou "*redshift* surveys", como são conhecidos entre os profissionais. Podemos citar, como exemplo, o Center for Astrophysics/CfA Survey, o Sloan Digital Sky Survey/SDSS, o Six Degree Field Survey/62dF, e o Automated Plate Measuring/APM Survey, entre outros. Os "*redshift* surveys" atingem distâncias menores que 1 bilhão de parsecs, ou cerca de 3 bilhões de anos luz (correspondendo a um *redshift* $z \sim 0.2$). A homogeneidade e isotropia do Universo começam a ser verificadas a partir de distâncias da ordem de 600 milhões de anos luz (cerca de 6×10^{26} cm, que eqüivalem a ~ 200 milhões de parsecs ou ~ 6 bilhões de trilhões de quilômetros). Até distâncias dessa ordem ainda são observados diversos tipos de estrutura, tais como vazios, paredes e estruturas filamentares. Desse ponto até o ponto onde se formou a RCFM (~ 13 bilhões de anos luz, equivalentes a $1{,}23 \times 10^{28}$ cm ou 120 bilhões de trilhões de quilômetros) existe uma lacuna de informações, mas

estimativas teóricas sugerem que esse foi o intervalo de tempo necessário para que a distribuição inicial de matéria evoluísse para formar as primeiras estruturas 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 RCFM reflete o estado de equilíbrio termodinâmico no Universo jovem, a aceleração do Universo recentemente observada em medidas de supernovas tipo I e a velocidade de recessão das galáxias distantes são fortes evidências do processo de expansão do Universo. Eles serão descritos, separadamente, **nas seções 9.2.2, 9.3.4 e 9.3.5.**

9.2.2 LEI DE HUBBLE (OU A VELOCIDADE DE RECESSÃO DAS GALÁXIAS)

Em 1923, o astrônomo Edwin Hubble começou um estudo de estrelas 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 800.000 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 na descoberta de uma 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. Definimos o *redshift* **z** a partir do deslocamento causado pelo efeito Doppler medido nas linhas espectrais:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

em que λ é o comprimento de onda medido na estrela e λ_0 é o comprimento de onda da linha em repouso, ou seja, medido no laboratório. Utilizando a relação acima, escrevemos v=zc e podemos escrever:

$$cz = v = H_0.D.$$

A constante $\mathbf{H_0}$ é conhecida como constante de Hubble é 71±6 km/(s.Mpc). Esse valor tem dimensão $[t]^{-1}$, logo é possível, usando os valores medidos de **d** e **v**, fazer uma estimativa da idade do Universo. Essa estimativa fica como um exercício para o leitor.

Note que essa expressão só é linear para pequenos "*redshifts*" (tipicamente, z < 1). Essas observações mostraram uma afastamento sistemático e isotrópico, e foram confirmadas até distâncias de centenas de milhões de pc. A **Figura 9.3** apresenta um diagrama com as primeiras observações feitas por Hubble, publicadas em 1929, e a extrapolação usando medidas de objetos mais distantes, em 1931. 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, e o resultado obtido aparece na **Figura 9.3 (esquerda).**

Qualquer observador no nosso Universo, situado numa galáxia distante, 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. Em homenagem a Edwin Hubble, a NASA colocou seu nome em um telescópio espacial que foi lançado em abril de 1990. Entre vários resultados espetaculares que o Telescópio Espacial Hubble obteve, nos interessa o "Hubble Cepheid Key Project".

O gráfico à direita da **Figura 9.3** é baseado somente em dados coletados pelo Hubble, usando medidas de variáveis Cefeidas para determinar as distâncias. A inclinação da curva nos dá uma estimativa para a constante de Hubble de, aproximadamente, 70 km/s.Mpc. Com o Telescópio Hubble podemos, assim como Edwin Hubble, estudar Cefeidas, só que localizadas a distâncias trinta vezes maiores que as medidas feitas na década de 1920.

9.2.3 TESTES CINEMÁTICOS: RELAÇÕES LUMINOSIDADE X REDSHIFT E DISTÂNCIA ANGULAR X REDSHIFT

Objetos distantes podem ser estudados a partir da sua luminosidade aparente e, com instrumentos suficientemente sensíveis, é possível medir seu diâmetro angular. Tanto a luminosidade aparente quanto o diâmetro angular dependem dos parâmetros cosmológicos que descrevem o Universo em que vivemos e seus valores variam com o redshift em que o objeto se encontra. O diâmetro angular de uma fonte distante é dado por:

$$\Delta\theta = \frac{d}{D}(1+z)$$

em que d é o comprimento físico do objeto, D é a distância cosmológica até ele, θ é o tamanho angular aparente e z é o redshift. O termo D/(1+z) é a chamada *distância de diâmetro angular*.

Figura 9.3 – Gráfico da Lei de Hubble inclui os dez maiores aglomerados de galáxias.(esquerda) O quadrado no canto inferior esquerdo representa as galáxias observadas por Hubble (Fonte: adaptada de Ferris, pág. 157). O diagrama à direita foi produzido somente com medidas de variáveis Cefeidas feitas pelo Telescópio Espacial Hubble. (Fonte: **http://hubblesite.org/newscenter/archive/1999**).

Raciocínio semelhante é usado para o cálculo da intensidade aparente e sua relação com a luminosidade intrínseca de um objeto distante. Sabendo que há um decréscimo na intensidade em função da distância da fonte, e que há um aumento adicional em função da expansão do Universo, podemos escrever a relação entre o fluxo recebido na Terra e a luminosidade intrínseca emitida pela fonte, incluindo o efeito do *redshift*, da seguinte forma:

$$F_{obs} = \frac{L_{fonte}}{4\pi D^2(1+z)^2}$$

em que o termo $D^2(1+z)^2$ é conhecida como *distância de luminosidade*.

9.2.4 CONTAGEM DE GALÁXIAS

Um outro teste cinemático é baseado na contagem dos objetos cosmológicos dentro um dado intervalo de *redshifts*. Seja N(z) o número de galáxias por unidade de volume em um determinado redshift z. Supondo que esse número é espacialmente uniforme, o número de galáxias distribuídas no intervalo de redshifts entre z e z + Δz, dentro de um ângulo sólido $\Delta\Omega$ é:

$$\frac{dN}{d\Omega dz} \propto \frac{N(z)}{(1+z)^3}$$

As expressões para as relações de diâmetro angular, luminosidade e contagem de galáxias podem, todas, ser reescritas colocando-as em termos dos parâmetros cosmológicos primários, que serão apresentados **na seção 9.3.2**.

9.2.5 O ARCABOUÇO TÉORICO DE FRIEDMANN, LEMAITRE, ROBERTSON E WALKER

Até cerca de 1950, a Cosmologia era uma ciência essencialmente teórica, com praticamente nenhum suporte observacional ou atividade experimental que pudesse validar os modelos de Universo então vigentes. Esses modelos possuíam as mais diversas características e a imensa maioria evoluiu a partir das soluções das equações propostas por Albert Einstein em 1915, como parte da sua TRG, para descrever o movimento de corpos em referenciais acelerados. A versão mais completa, em formato tensorial das equações tem a forma:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}.$$

em que $\mathbf{g_{\mu\nu}}$ é o tensor que define a métrica do espaço-tempo, $\mathbf{R_{\mu\nu}}$ é o tensor de curvatura de Ricci, **R** é o escalar de curvatura, **Λ** é a constante cosmológica, $\mathbf{T_{\mu\nu}}$ é o tensor stress-energia, **G** é a constante de gravitação e **c** é a velocidade da luz. Esse conjunto de equações foi resolvido em 1922, para um universo homogêneo e isotrópico em expansão, no contexto da TRG, por Alexander Friedmann (1888 – 1925), resultando nas chamadas equações de Friedmann, descritas na próxima seção.

O abade Georges Lemaitre (1894 – 1966) também trabalhou na compreensão das equações de Einstein e foi o primeiro a propor a teoria da expansão do Universo, erroneamente atribuída a Edwin Hubble. Ele foi o primeiro a deduzir o que é hoje conhecido como Leio de Hubble e fez as primeiras estimativas da constante de Hubble, publicadas em 1927, dois anos antes do artigo de Hubble. Lemaitre também propôs o que posteriormente ficou conhecido como o modelo do Big Bang sobre a origem do Universo, chamado por ele de "hipótese do átomo primordial" ou "Ovo Cósmico".

Ao descrever fenômenos no espaço tridimensional, utilizamos um sistema de coordenadas que caracteriza univocamente a posição de um corpo neste espaço. Em coordenadas cartesianas, provavelmente mais conhecidas do leitor, o elemento de linha que descreve a trajetória de um objeto no espaço Euclidiano é escrito como:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2.$$

Coordenadas esféricas (r, θ, φ) permitem descrever de maneira mais adequada a trajetória de um objeto em uma geometria esférica. Nesse caso, a equação (2) assume a forma:

$$ds^2 = dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 sen^2\theta d\phi^2.$$

Se mantivermos r constante, o objeto somente se movimenta sobre uma superfície esférica. Caso r varie, teremos movimento "para dentro" ou "para fora" da superfície.

Ao descrever fenômenos que variam no espaço e no tempo, devemos incluir uma variável temporal no elemento de linha Euclidiano, transformando a equação (2) em:

$$ds^2 = cdt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

ou

$$ds^2 = c^2dt^2 - (dr^2 + r^2d\theta^2 + r^2sen^2\theta d\phi^2).$$

Em geral, relações que descrevem a distância ***ds*** entre dois pontos no espaço são chamadas de *métricas*. As métricas (4) e (5) são também conhecidas como métricas de Minkowski, bastante usadas em cálculos na Teoria da Relatividade Restrita. Como tentamos descrever o Universo com modelos baseados na **TRG**, é necessário que sejamos capazes de incluir a forma do espaço-tempo que descreve o Universo na métrica desejada. Como veremos mais à frente, supomos, como hipótese de trabalho, que o Universo é homogêneo e isotrópico.

De várias métricas possíveis, existem somente três que satisfazem às condições de homogeneidade e isotropia: um Universo plano (ou Euclidiano, em que a soma dos ângulos internos de um triângulo é igual a 180 graus), um Universo aberto (em que a mesma soma é menor que 180 graus) ou um Universo fechado (em que a soma é maior que 180 graus). Sem entrar em detalhes, vamos mencionar que a métrica que incorpora essas três possibilidades foi descrita na década de 30 por Howard Robertson (1903 – 1961) e Arthur Walker (1909 – 2001) e é conhecida por métrica de Robertson-Walker:

$$ds^2 = c^2dt^2 - R(t)^2(\frac{dr^2}{1-\kappa r^2} + r^2d\theta^2 + r^2sen^2\theta d\phi^2).$$

Ela incorpora as três possibilidades de curvatura na variável **κ**, e a expansão do Universo, no termo **R(t)**, também chamado "fator de escala". É ele quem descreve se distâncias cósmicas estão aumentando ou diminuindo com o passar do tempo. Podemos imaginar essa métrica como uma extensão da métrica de Minkowski para um espaço homogêneo e isotrópico, não plano e não estático.

As equações de Einstein (1) relacionam a evolução de R(t) com a pressão e a energia expressa em Tμν. Usando a métrica de Robertson-Walker, os termos de (1) são calculados explicitamente e, considerando que a energia no Universo pode ser tratada como um fluido perfeito, substituímos esses valores em (1) e o resultado são as chamadas equações de Friedmann, que descrevem um fluido homogêneo num Universo homogêneo e isotrópico em expansão:

$$\begin{aligned}(\frac{\dot{R}}{R})^2 &= \frac{8\pi G\rho}{3} + \frac{\Lambda c^2}{3} + (\frac{\kappa c}{R})^2 \\ (\frac{\ddot{R}}{R}) &= -\frac{4\pi G\rho}{3}(\frac{\rho + 3p}{c^2}) + \frac{\Lambda c^2}{3}\end{aligned}$$

Na equação (7a), o termo à esquerda descreve, de forma simplificada, a energia cinética da expansão, com dimensão de (velocidade)^2. O lado direito possui diversos termos de inércia, caracterizando, de forma simplificada, as energias potenciais dos diversos parâmetros cosmológicos: a matéria-energia, representada por ρ, a energia do vácuo (sobre a qual falaremos quando tratarmos de energia escura), representada por Λ e a curvatura, representada por κ^2.

A segunda equação (7b) descreve a aceleração do Universo, e resume a física que governa a expansão, em que p a é pressão de radiação e ρ é a densidade de matéria-energia. No caso de $p << \rho$, o Universo é desacelerado pela presença de matéria (caso em que o Universo será não relativístico). Para um universo dominado por matéria relativística ($p = \rho/3$), a desaceleração será o dobro do caso não relativístico. No caso de $p = -\rho$, o Universo é dominado pela energia do vácuo (em que Λ assume o papel da chamada Energia Escura), ocorrendo a aceleração da expansão.

9.3 O UNIVERSO PRIMORDIAL

9.3.1 COMPOSIÇÃO

O cenário previsto pelo MCP sugere que o Universo foi **criado** há cerca de 14 bilhões de anos, a partir de um estado de densidade, temperatura e pressão extremamente altas. Esse evento é conhecido como Big Bang (Grande Explosão) e considera-se que o Universo começou a expandir-se e resfriar-se a partir desse instante, considerado o "instante zero (t=0)". Todas as referências a intervalos de tempo cosmológicos são, em geral, feitas em relação ao "instante zero".

Até cerca de 0,01 segundos, a temperatura era muito alta e havia formação e aniquilação incessante de pares de partículas elementares. Essa época era conhecida como a "fase hadrônica", quando o plasma de quarks e glúons (constituído dos pares acima mencionados) transformou-se em "hádrons" após a temperatura cair para valores abaixo de 1 bilhão de graus K. Nesse momento, 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 presentes nos organismos vivos). Também restaram fótons e neutrinos, partículas difíceis de serem detectadas e que possuem massa extremamente pequena (cujo valor foi recentemente estimado), e carga elétrica nula. A composição do Universo hoje inclui hádrons (prótons e nêutrons), léptons (elétrons e neutrinos), radiação e duas componentes desconhecidas, a Matéria Escura e a Energia Escura, que constituem a maior parte dessa composição. A proporção das componentes do Universo está

representada na **Figura 9.4**. Note o disco à direita, que representa TUDO o que pode ser diretamente observado por emissão de radiação eletromagnética no Universo.

Figura 9.4 – Esquerda: Distribuição das componentes do Universo; Direita: distribuição de matéria ordinária, considerando bárions e léptons (neutrinos). Fonte: Wikimedia Commons (2017)

9.3.2 UMA BREVE HISTÓRIA TÉRMICA

A temperatura da RCFM diminui com a expansão do Universo e está diretamente ligada ao *redshift* pela relação

$$T_{RCFM}(z) = T_{RCFM_0}(1+z).$$

e pode usada como alternativa ao tempo ou ao *redshift* para parametrizar a história do Universo. Os principais eventos da história térmica do Universo são:

- $t < 10^{-43}$ s ($E > 10^{19}$ GeV) – momentos próximos à chamada escala de Planck, em que a relatividade geral deixa de ser válida, e o Universo encontra-se no regime da gravitação quântica. A questão do que é a singularidade de onde o Universo foi formado é extremamente importante neste regime;
- $10^{-43} - 10^{-14}$ s (10^{19} GeV – 10 TeV) – a energia disponível logo após a separação da força gravitacional das outras forças, em $\sim 10^{-43}$ s e, nesse período o Universo entra no regime da relatividade geral, embora sua composição "química" seja incerta. O processo de expansão inflacionária, que será descrito adiante, ocorre nesse intervalo ($t \sim 10^{-33}$ s), bem como o surgimento da assimetria matéria – antimatéria;
- $10^{-14} - 10^{-10}$ s (10 TeV – 100 GeV) – nesse regime o modelo em que as forças eletrofraca e nuclear forte é válido e as reações que ocorrem nesse intervalo de energias pode ser reproduzido nos aceleradores de partículas atuais;
- 10^{-5} s ($\sim$ 200 MeV) – a transição glúon – quark ocorre nessa faixa de energias, confinando-os em bárions e mésons e criando os prótons e nêutrons usados na

nucleossíntese primordial;

- 0,2 s (~ 1 – 2 MeV) – os neutrinos primordiais desacoplam-se das demais partículas nessa época e a razão entre prótons e nêutrons é estabilizada. O número de nêutrons livres nessa época determina a abundância dos elementos leves descrito na **sec. 9.3.4.**
- 1 s (~ 0,5 MeV) – a energia disponível é da ordem da massa de repouso dos elétrons e pósitrons. A aniquilação de pares deixa um excesso residual de elétrons sobre pósitrons, da ordem de 1 elétron para cada bilhão de fótons produzidos, que encontram-se em equilíbrio térmico;
- 200 – 300 s (~ 0,005 MeV) – a energia disponível favorece as reações nucleares e permite a junção de prótons e nêutrons livres em átomos de Deutério, Hélio e Lítio;
- 10^{11} s (~ 1 eV) – essa época corresponde à igualdade entre as densidades de matéria e radiação, separando as épocas de dominação de cada uma sobre a dinâmica do Universo;
- 10^{12} – 10^{13} s (< 0,1 eV) – nessa época, prótons e elétrons que se encontravam livres até então passaram gradualmente a se combinar para formar átomos de Hidrogênio. 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 9.5**). 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. Este processo é conhecido como *desacoplamento*.

Figura 9.5 –À esquerda, o acoplamento causada pelo espalhamento Thomson obriga os fótons a percorrerem um caminho aleatório. Após a recombinação (à direita), os fótons podem ser propagar livremente pelo Universo. Fonte: http://universeadventure.org.

- 10^{16} – 10^{17} s (T < 10 K) – início da formação de estruturas a partir das flutuações de densidade primordial, como consequência das instabilidades gravitacionais. Duas questões não resolvidas aparecem nessa época: a natureza da matéria e da energia escuras.

A temperatura dos fótons da RCFM **decresce** proporcionalmente à taxa de expansão do Universo, mas mantendo suas características. Hoje sua temperatura é de ~ 2,7260 K, praticamente uniforme em todo Universo e nos permite estimar que o aumento relativo do tamanho do Universo nesse período, considerando que a temperatura na época do desacoplamento entre a matéria e a radiação era cerca de 3000 K, foi de um fator 1000 (~ 3000/3). Logo, o Universo hoje é mil vezes maior que na época da recombinação.

A **Figura 9.6** apresenta um resumo da história térmica, com os equivalentes em energia, temperatura e tempo. Conforme olhamos para pontos mais distantes do vértice, olhamos para objetos mais distantes de nós e, como consequência, cada vez mais jovens.

Figura 9.6 – Diagrama descritivo da história do Universo. Os números na parte inferior descrevem, respectivamente, o tempo (época) e a energia (temperatura) correspondentes a cada evento. Cada linha magenta representa um grande evento na história cósmica. Da esquerda para a direita: época da Grande Unificação (10^{-44} s); inflação (10^{-32} s); desacoplamento das forças eletrofraca e forte (10^{-10} s); nucleossíntese primordial (entre 10^{-2} s e 180 s); desacoplamento matéria-radiação (3 x 10^5 anos); formação de estruturas (1 x 10^9 anos); época atual (12 x 10^9 anos). Fonte: Particle Data Group, LBNL (2008).

9.3.3 INFLAÇÃO

O Universo observável hoje é extremamente homogêneo e isotrópico e é difícil explicar porque partes do Universo muito distantes, e sem nenhuma conexão causal (ou seja, situadas a distância maior do que o raio do Universo hoje) que possa justificar essa

isotropia, tem as mesmas propriedades globais. Isso é conhecido, entre os especialistas, como *a questão do horizonte*.

A relação entre a lei de Hubble, que governa a expansão do Universo, e a gravidade, que a desacelera, também parece ser extremamente bem ajustada. Um pequeno desvio nesse balanço entre energia cinética e potencial poderia causar um colapso imediato do Universo ou uma expansão tão rápida que não haveria tempo de formar estruturas. Assim, a densidade do Universo (que, de forma simplificada, pode ser comparada à razão entre as energias cinética e potencial) tem que ser igual à unidade. A implicação disso é que o Universo deve ser plano. No jargão cosmológico, esse é o chamado *problema da planura*.

A proposta de um Universo em expansão extremamente rápida, num intervalo de tempo extremamente curto, é possível se, nesse tempo, a gravidade exerça uma pressão negativa acelerando o Universo, de forma que o fator de escala $a \sim e^{t/T}$, em que t é o tempo próprio do Universo e T é a temperatura (ou energia média). Esse processo é chamado de Inflação, e foi inicialmente proposto por Alan Guth (1947 –) e Paul Steinhardt (1952 –) em 1980. A Inflação deve ter ocorrido entre 10^{-34} s e 10^{-32} s, causando o aumento do raio do Universo por um fator $\sim e^{100} \sim 10^{43}$ (10^{-26} m para $\sim 10^{17}$ m).

A Inflação permite que os problemas da planura e do horizonte sejam resolvidos de uma forma elegante, fazendo com que regiões causalmente desconectadas no Universo hoje possam apresentar as mesmas propriedades, uma vez que, antes da Inflação, elas estavam em contato causal. A definição mais geral de Inflação é "uma época de expansão exponencial do Universo, quando a gravidade atua como uma força negativa".

Alguns problemas, entretanto, surgem ao adotarmos a ideia de um Universo Inflacionário. Por exemplo, como explicar porque a gravidade torna-se repulsiva durante um infinitésimo de segundo? Qual seria o mecanismo disparador do processo inflacionário? Os modelos de física de partículas conseguem explicar a energia necessária para essa aceleração em termos da relação entre pressão e densidade existente na eq. de Friedmann (7b).

Por outro lado, uma das grandes previsões da Inflação, confirmada na década seguinte, é que deveria haver pequenos desvios dessa homogeneidade em grande escala, e que essas "perturbações" deveriam ter um espectro característico, que são vistas hoje diretamente como as perturbações da RCFM. Sua origem são as flutuações quânticas, presentes no fluido matéria-radiação; durante a Inflação seus comprimentos de onda são amplificados como todo o resto do Universo, tornando-se macroscópicos. O resultado hoje é um espectro de flutuações de matéria com basicamente as mesmas propriedades em num enorme intervalo de comprimentos de onda, ou *invariantes em escala*.

As perturbações produzidas durante o processo inflacionário são do tipo escalar (que estão correlacionadas com as flutuações de temperatura da RCFM) e tensoriais (correlacionadas com ondas gravitacionais) e que produziriam um certo tipo de polarização na RCFM conhecido na literatura como modos B, ou rotacionais.

9.3.4 NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL

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.

O processo de criação, que ocorreu de ~ 0,01 s a ~ 200 s, dependia das fases anteriores, em que a quantidade de elétrons, neutrinos, prótons e nêutrons livres ditaram a taxa de reações. Particularmente, a diferença de massa entre próton e nêutron, e o fato de nêutrons livres terem uma meia vida bastante curta (cerca de 10 minutos), combinados com a expansão do Universo, definiram a composição química inicial. Um Universo com a taxa de expansão diferente ou com um valor da constante de estrutura fina $\alpha \neq 1/137$ certamente teria uma outra forma.

A primeira análise das condições extremas do Universo jovem foi feita por George Gamow (1904 – 1968) e colaboradores, em 1948, que descobriram que a composição do Universo jovem não deveria conter outros elementos além do H, D, He e Li. Os cálculos atuais indicam que sua distribuição obedece às proporções mostradas na **Figura 9.7**. É sabido pelos astrônomos que praticamente todos os elementos mais pesados que o Hélio são formados no interior das estrelas, durante as reações nucleares que as fazem brilhar, ou na fase de supernovas, quando os elementos mais pesados que o Ferro (até o Urânio) são sintetizados.

Figura 9.7 – Abundância relativa dos elementos leves em relação ao Hidrogênio. A linha vermelha central define os valores para cada um dos elementos, estimado a partir de medidas do satélite WMAP, considerando que a descrição do Universo concorda com o MCP (Fonte: https://map.gsfc.nasa.gov/).

O trabalho teórico sobre a nucleossíntese explicou completamente a origem dos primeiros elementos mais pesados que o Hidrogênio e somente restou uma explicação cosmológica para a abundância observada do Hidrogênio e do Hélio. A teoria de Gamow aplicada ao MCP fornece a proporção exata observada dos dois elementos, sendo que o momento da formação ocorreu nos primeiros minutos 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 determinar, indiretamente, as condições físicas cerca de dois a três minutos após a criação do Universo. A partir desse ponto "para trás", isto é, na direção do "instante zero", somente podemos deduzir algo sobre o Universo através de cálculos, simulações e especulações teóricas.

9.3.5 A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO EM MICROONDAS

A RCFM é uma forte evidência de que o Universo, em uma época distante no passado, era muito mais denso e quente do que é hoje. Para produzir uma radiação com suas características, o Universo deveria ser completamente diferente do que vemos hoje nos céus. Nessa época não existiam ainda planetas, estrelas e galáxias, pois o Universo estava completamente preenchido pelo "plasma primordial", constituído somente de radiação e partículas elementares extremamente quentes. Sua descoberta em 1964

trouxe uma nova era de observações para confrontar os modelos cosmológicos, até então praticamente restritos a considerações teóricas.

A RCFM, formada cerca de 380 mil anos após o Big Bang, foi-se resfriando por causa da expansão e hoje a temperatura medida é de 2,726 K. Essa temperatura corresponde à faixa de micro-ondas no espectro eletromagnético e é praticamente uniforme em 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.

Medidas da RCFM são feitas num intervalo entre dezenas e centenas de GHz, em toda a esfera celeste, preferencialmente fora do plano da Via Láctea. Das medidas feitas desde sua descoberta, em 1964, concluímos que ela tem praticamente as mesmas características de quando foi criada, exceto pela temperatura, que diminuiu por causa da expansão do Universo. A evolução posterior do Universo, durante o processo de formação de estruturas não afetou significativamente as propriedades a RCFM, de modo que a temperatura hoje pode ser relacionada com a temperatura em um *redshift*, como descrito anteriormente.

A RCFM é considerada um resíduo cósmico praticamente intocado e nos oferece uma excelente oportunidade de estudar os detalhes do Universo jovem. Os mecanismos de origem e evolução das estruturas que vemos hoje no Universo estão diretamente ligados às condições físicas no Universo jovem, impressas nas características da RCFM, de modo que estuda-la ajuda nossa compreensão daqueles processos. A RCFM pode ser estudada através de seu espectro, sua distribuição angular de temperatura e sua polarização.

O MCP prevê que a RCFM deve apresentar um espectro conhecido como *espectro de corpo negro*, cuja forma depende somente da temperatura do corpo emissor, descrito como um conjunto de medidas da intensidade em diferentes frequências. O melhor resultado até a presente data foi obtido pelo satélite COBE, em 1994, e pode ser visto na **Figura 9.8.**

A medida do espectro indica que a temperatura da RCFM é de ~ 2,726±0,001 K com o pico de emissão na faixa de micro-ondas. Como exemplo comparativo, o espectro de corpo negro do Sol, cuja temperatura é de 6000 K, possui o pico numa frequência correspondente à luz visível. O comportamento quase perfeito de corpo negro da RCFM indica que houve poucos fenômenos globais que afetassem o equilíbrio termodinâmico entre radiação e partículas antes de 380.000 anos.

Figura 9.8 – Espectro de corpo negro teórico com T = 2,726 K, superposto a medidas feitas por diferentes instrumentos no solo, a bordo de balão, a bordo de foguete e a bordo do satélite COBE. O pico encontra-se próximo da freqüência de 200 GHz. A escala de intensidade no eixo Y é de intensidade por ângulo sólido por frequência. Fonte: https://inspirehep.net/record/1295471/plots.

O estudo da distribuição angular da RCFM mostra a existência de pequenas flutuações de temperatura em torno de 2,7 K. Essas flutuações, ou *anisotropias*, contém informação sobre a distribuição de matéria no Universo jovem. Sua amplitude é da ordem de uma parte em 100.000, ou 10^{-5}. Podemos fazer uma comparação para ilustrar essa diferença. Se pudéssemos esticar "perfeitamente" um lençol de 1 km x 1 km, ao observa-lo de longe, teríamos a sensação de que ele não possui nenhuma ruga ou amassado. Isso é o equivalente a observar a distribuição de 2,7 K na RCFM. As flutuações de temperatura corresponderiam a pequenas ondulações no lençol, de poucos centímetros de amplitude. Apesar de sua baixa amplitude, são elas que deram origem às estruturas extremamente complexas que observamos hoje no Universo.

Em 1992, o satélite COBE (**Co**smic **B**ackground **E**xplorer), lançado pela NASA com o propósito de estudar as características da RCFM detectou, de maneira conclusiva, que a distribuição de temperatura da RCFM apresenta anisotropias da ordem de 10^{-5} (**Figura 9.9, superior**). Logo após o resultado do COBE, diversos experimentos confirmaram a existência de flutuações na RCFM em diferentes escalas angulares. Em 2003 e 2013, os satélites WMAP (**W**ilkinson **M**icrowave **A**nisotropy **P**robe, da NASA) e Planck (da Agência Espacial Européia – ESA) publicaram resultados que mostram, em muito mais detalhes, exatamente o mesmo tipo de estrutura medida pelo COBE em 1992 (**Figura 9.9, centro e em baixo**).

Figura 9.9 – Comparação entre os mapas das flutuações de temperatura feitos pelos três satélites dedicados a medir a RCFM. As manchas azuis (mais frias) e vermelhas (mais quentes) correspondem às flutuações de temperatura no Universo jovem. Deve-se notar o aumento de qualidade dos mapas, correspondentes à melhor resolução dos detectores. Fonte: http://slideplayer.com/slide/10583101.

Devido ao acoplamento entre matéria e radiação no Universo jovem, esperava-se que existissem oscilações, equivalentes as ondas acústicas, no fluido. A distribuição das anisotropias da RCFM apresenta uma série de picos, chamados de picos acústicos, descritos como um oscilador harmônico amortecido (**Figura 9.10**). Esses picos, cuja posição e amplitude variam em função da escala dos processos físicos, contêm informações sobre a quantidade e o tipo de matéria que constitui o Universo, sua idade e sua geometria.

A terceira característica da RCFM é a existência de um grau de polarização na distribuição angular, devido a diferentes processos físicos: espalhamento devido à interação dos elétrons com os fótons na última superfície de espalhamento (espalhamento Thomson), injeção de radiação durante a formação das primeiras estrelas e a distorção do espaço-tempo causada por ondas gravitacionais produzidas durante a Inflação.

Uma onda eletromagnética é dita linearmente polarizada quando o seu campo elétrico se encontra oscilando sempre numa mesma direção. Caso a direção varie com o tempo, a onda será circularmente polarizada. Em geral, um campo de radiação qualquer, que é a superposição de ondas eletromagnéticas polarizadas em todas as direções, apresenta

apenas uma porcentagem de sua intensidade total com uma polarização bem definida, gerando um padrão que pode ser mapeado.

Figura 9.10 – Espectro de potência angular das flutuações de temperatura da RCFM. Em destaque encontram-se os picos acústicos, causados por diferentes processos físicos antes e durante o período da recombinação. Fonte: Autoria própria.

O padrão de polarização observado segue o padrão das flutuações observadas na RCFM. Os primeiros resultados de medidas de polarização só foram anunciados em 2002, apesar de as primeiras tentativas para detectá-la terem começado na década de 70. Para a RCFM, esta fração polarizada corresponde de 0,1% a 1% da amplitude das flutuações de temperatura, dependendo do processo físico que deu origem à polarização.

A distribuição da polarização no plano do céu pode ser sempre decomposta em uma componente gradiente e uma componente rotacional, da mesma forma que um campo vetorial pode ser descrito pela soma dos termos gradiente e rotacional. Essa técnica é extremamente útil pois os processos físicos que geram polarização produzem componentes rotacional, ou tensorial (ondas gravitacionais) e gradiente, ou escalar (espalhamento Thomson).

Fenômenos presentes no momento da recombinação produziram polarização escalar através do espalhamento Thomson dos fótons pelos elétrons do fluido primordial, com uma intensidade da ordem de 1%. Mais tarde, quando as primeiras estrelas de grande massa surgiram (cerca de 200 milhões de anos após o Big-Bang), a luz que elas emitiram foi capaz de ionizar as moléculas de Hidrogênio que permeavam o Universo, num processo conhecido como reionização. Os elétrons liberados durante a reionização

também interagiram com os fótons presentes no meio, inclusive aqueles da RCFM, polarizando-os numa taxa de ~ 1%, escalas angulares de vários graus.

Deformações no espaço-tempo, decorrentes da passagem de ondas gravitacionais produzidas durante a Inflação, distorcem o plasma primordial, introduzindo uma orientação na distribuição de temperatura no espaço-tempo, que é descrita por um tensor. O espalhamento dos fótons pelos elétrons nesse caso polariza a radiação por uma fração < 0,1%, devido à pequena amplitude das ondas gravitacionais. Este tipo de polarização tem características distintas e permitem uma completa caracterização das ondas gravitacionais que a produziram.

O padrão de polarização gradiente (ou escalar) da RFCM, feito com os dados de 5 anos coletados pelo satélite WMAP, é representado pelos segmentos de reta pretos, sobre a distribuição das flutuações de temperatura (**Figura 9.11**). Já uma simulação dos modos rotacionais (ou tensoriais) pode ser vista na **Figura 9.12**.

9.4 O UNIVERSO NÃO-HOMOGÊNEO

Uma das sugestões mais atraentes (e também a mais simples) para explicar o processo de formação de estruturas é considerar que a gravidade causou a aglutinação de matéria em regiões que, após o desacoplamento entre matéria e radiação, eram inicialmente um pouco mais densas que suas vizinhanças. Durante milhões e 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 começaram a se formar.

Figura 9.11 – Mapa de flutuações de temperatura da RCFM, com resolução angular de 1°, contendo os segmentos de reta superpostos às flutuações, produzido com os dados de 5 anos do satélite WMAP. Fonte: Kim *et al.* ArXiv:0810.4008 [astro-ph] (2008).

Figura 9.12 – O padrão gradiente (escalar) é chamado de modo E (E-mode) no jargão dos pesquisadores da RCFM. O padrão escalar é simétrico, refletindo as condições físicas que o geraram (espalhamento Thomson). O padrão rotacional (tensorial) indica uma distorção da radiação devido à interação com objetos massivos pelos quais ela passou (ou pela altíssima densidade do Universo primordial, onde ela também pode ter sido gerada), permitindo o mapeamento da distribuição de matéria ao longo do caminho ótico da RCFM. Fonte: Wayne Hu (2001).

A dinâmica do Universo representado pelo MCP parte da TRG, o suporte observacional é dado pelas observações da RCFM, da velocidade de recessão das Galáxias, da expansão acelerada hoje observada no Universo e pela abundância de elementos leves (H, He, D, Li). O paradigma da instabilidade gravitacional é responsável por utilizar as flutuações de matéria para formar as estruturas que observamos e consideramos que essas flutuações, não importa o tamanho, tem essencialmente a mesma amplitude.

As perguntas que o MCP deixa sem resposta, entretanto, são tão interessantes quanto as que ele responde: porque a geometria do Universo deve ser aproximadamente plana? Por que a RCFM apresenta flutuações tão pequenas? Quem gerou as flutuações de densidade que evoluíram para formar as estruturas? Onde estão as partículas estranhas, previstas pela Física de Partículas e provavelmente criadas no Universo jovem? As respostas a essas perguntas são tratadas como uma extensão ao MCP e, apesar de interessantes e parcialmente respondidas no contexto do Universo Inflacionário, não serão discutidas nesse texto.

9.4.1 COLAPSO GRAVITACIONAL

Conforme mencionamos anteriormente, observamos que as galáxias distantes estão se afastando umas das outras e deduzimos que o Universo está em expansão. Isso nos leva a pensar que o Big Bang foi o começo de tudo. As principais motivações da Cosmologia são medir tamanho, idade e forma do Universo. Por tamanho entendemos a maior distância que podemos estudar; a idade é contada em relação ao instante zero e a forma está ligada à geometria do Universo, definida pela quantidade de matéria existente.

A Cosmologia tenta traçar um perfil da evolução do Universo da 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 grandes estruturas observadas no céu hoje (aglomerados e superaglomerados de galáxias) parecem ter sido formadas a partir de pequenos desvios do equilíbrio no Universo jovem e a força da gravidade fez com que regiões mais densas (com mais matéria) se expandissem mais lentamente e, colapsando sob o efeito de sua própria gravidade, se aglutinassem para formar os primeiros objetos. Ainda hoje, sabemos pouco sobre esse processo de evolução.

Resultados dos satélite WMAP e Planck indicam que a formação dos primeiros objetos ocorreu cerca de 100 – 200 milhões de anos após o Big Bang, e daí para formação das primeiras galáxias, foram mais algumas centenas de milhões de anos. Acredita-se também que o processo de formação aconteceu das pequenas para as grandes estruturas, com estrelas se formando primeiro e juntando-se posteriormente para formar galáxias (uma evolução hierárquica conhecida como *bottom-up*).

O entendimento atual é que as grandes estruturas se formaram a partir do colapso inicial da matéria escura, interagindo somente através da gravidade. Embora o tratamento completo do colapso exija o uso da TRG, uma compreensão razoável do fenômeno pode ser obtida usando-se o formalismo mais simples, baseado nas leis de Newton.

Podemos considerar o contraste de densidade $\delta\rho/\rho$, em que ρ é a densidade de matéria, para descrever os cenários de colapso gravitacional. O regime em que $\delta\rho/\rho \leq 1$ é um regime linear, quando as perturbações crescem lentamente. Quando $\delta\rho/\rho > 1$, o crescimento das perturbações torna-se não linear, desacoplando-se da expansão cósmica em que estava contido até então, formando as estruturas singulares, independentes e gravitacionalmente ligadas que são observadas hoje.

As questões a serem respondidas sobre o colapso gravitacional das perturbações de densidade primordial dizem respeito: 1) aos mecanismos de evolução em um Universo em expansão, e 2) às condições iniciais necessárias para a formação de estruturas.

O problema do colapso pode ser abordado através do chamado formalismo de Jeans, que descreve o colapso de uma estrutura gravitacionalmente ligada, a partir da relação de dispersão

$$\omega^2 = c_s^2\kappa^2 - 4\pi G\rho_0$$

em que c_s é a velocidade das perturbações no meio, κ é o inverso do comprimento de onda λ da perturbação ($=2\pi/\lambda$), ρ_0 é a densidade das perturbações e G é a constante de gravitação Universal. Daí, derivamos o comprimento de onda típico de uma

perturbação, λ_J, que define o tamanho típico que uma perturbação deve ter para resistir ao colapso gravitacional:

$$\lambda_J \equiv c_s(\frac{\pi}{G\rho})^{1/2}$$

A região em que a perturbação se encontra torna-se instável se $\lambda > \lambda_J$.

O passo seguinte é tratar o problema considerando que a região que pode colapsar encontra-se em um Universo em expansão, de forma que a densidade média decai com a expansão. Nesse caso, o contraste de densidade pode ser escrito como:

$$\Delta = \frac{\delta\rho}{\rho} = \frac{\rho(a) - \rho_0(a)}{\rho_0(a)} = \frac{3}{5}(\frac{\Omega_0 - 1}{\Omega_0})a$$

em que Ω_0 é a densidade crítica do Universo. O caso relativístico não será discutido nesse texto, mas podemos destacar o seguinte: o crescimento das perturbações depende do fator de escala, crescendo inversamente à variação do *redshift*, seguindo a forma:

$$\rho_o = \rho_0(t_0)a^{-3}(t).$$

As soluções para as flutuações de densidade $\delta \sim \delta\rho/\rho$, para $\lambda >> \lambda_J$ são da forma:

$$\delta_+(t) = \delta_+(t_i)(\frac{t}{t_i})^{2/3}$$

$$\delta_-(t) = \delta_-(t_i)(\frac{t}{t_i})^{-1}$$

em que a solução (+) descreve o crescimento das perturbações com o tempo. É interessante chamar a atenção para a diferença entre os colapsos estáticos e dinâmicos a partir do comprimento de onda de Jeans: a expansão do Universo retarda o crescimento exponencial das instabilidades e resulta no crescimento, para os modos instáveis, que obedece a uma lei de potência.

9.4.2 FORMAÇÃO DE ESTRUTURAS

Face ao que já comentamos sobre as flutuações de densidade primordial, não é surpresa notar que galáxias existam, em sua maioria, em grupos e aglomerados. Galáxias e estruturas em grande escala são uma consequência das condições a que o Universo jovem estava sujeito. O que surpreendeu os astrônomos nas décadas de 80 e 90 não foi a existência, mas o tamanho das estruturas. Vazios típicos 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, são alguns dos resultados encontrados nos levantamentos de objetos distantes.

A lógica por trás do processo de formação de estruturas é que, embora galáxias distantes se afastem umas das outras à medida que o universo se expande, a gravidade atrai galáxias vizinhas entre si, formando grupos, aglomerados e enormes filamentos constituídos por centenas de milhares de galáxias. Muitas dessas estruturas são visíveis em mapas que cobrem regiões de milhares de graus quadrados no céu.

A teoria é baseada na TRG e busca resolver as equações que descrevem a evolução das perturbações de densidade do Universo. Os cálculos supõem que o Universo jovem possui perturbações aleatórias, energia escura e diversos 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 teorias que envolvem instabilidades gravitacionais, conforme apresentado na seção 9.3.1. Os resultados das simulações computacionais são comparados com as observações feitas, ajustes são feitos nos modelos que os computadores produzem e os cálculos são refeitos. A análise dessas comparações também é capaz de ajudar a colocar limites nos parâmetros que descrevem a matéria escura e da energia escura no Universo.

O objetivo de mapear essas estruturas, em diferentes distâncias, é entender os processos de formação e aglomeração das estruturas do Universo. Note que aqui estamos usando, de modo pouco rigoroso, o fato de que, quanto mais longe em distância podemos enxergar, mais "para trás no tempo" estamos indo. Esses mapeamentos podem ser comparados a fotografias do Universo em diferentes épocas, permitindo mapear a evolução desde pouco depois do surgimento da RCFM (após o desacoplamento entre a matéria e a radiação), até períodos bem mais recentes, quando o Universo já estava "aglomerado", e muito mais diferenciado.

Fazer mapas de galáxias em três dimensões requer um conhecimento de quão distantes os objetos se encontram de nós. 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. Hoje existem alguns levantamentos, tais como APM, 2MASS, 6dF, 2dF, SSDS, cada um com milhares a milhões de objetos mapeados. Em contraste, há 40 anos atrás, o número médio de galáxias com *redshift* conhecido era de apenas 2700.

Resultados recentes mostram evidências de que existem diversas estruturas com dimensões extraordinárias (~ 80 x 100 x 100 Mpc, ~ 70 x 140 x 140 Mpc). Existem ainda evidências, por observações da linha de emissão do Hidrogênio da série de Lyman, de que existem objetos a distâncias até 2700 Mpc, embora eles sejam poucos e espalhados pelo Universo observável (em termos de distribuição angular). As distâncias envolvidas no estudo das estruturas em grande escala variam de alguns milhões (tamanhos típicos de pequenos grupos de galáxias) a várias centenas de milhões de anos luz (distâncias da ordem da "Grande Muralha").

O primeiro dos grandes levantamentos feito de forma automatizada foi o APM (Automated Plate Measuring), liderado pela Universidade de Cambridge e publicado em 1990, por John Maddox (1925 – 2009) e colaboradores. Mais de 2 milhões de galáxias foram observadas em uma região de 100 graus de diâmetro centrada em direção ao pólo sul da Via Láctea (**Figura 9.13**). As regiões brilhantes indicam mais galáxias, enquanto as cores mais azuis indicam galáxias médias maiores. As elipses escuras excluem regiões em que as estrelas locais brilhantes dominam o céu. Muitas descobertas científicas resultaram deas análises dos dados desse mapa, incluindo o fato, confirmado posteriormente por todos os outros levantamentos, de que o universo era surpreendentemente complexo em grandes escalas.

Figura 9.13 – Levantamento APM, realizado durante a década de 80, com mais de 2 milhões de galáxias observadas. Fonte: https://apod.nasa.gov/apod/image/0306/galaxies2_apm_big.gif.

A **Figura 9.14** é o resultado do levantamento de redshifts conhecido como Sloan Digital Sky Survey (SDSS), financiado pela Alfred P. Sloan Foundation e pelo Departamento de Energia (EUA) e constituído pelo Consórcio de Pesquisa em Astrofísica para as instituições participantes da colaboração SDSS. As medidas do SDSS começaram em 2000 e hoje ele se encontra na chamada Fase IV, que cobrirá o período 2014 – 2020. Os mapas mais recentes do SDSS são os DR13 (Data Release 13), liberados em 20013, tendo observado ao todo, mais de 4 milhões de espectros de ~ 1.5 milhões de galáxias e ~ 160.000 quasares.

Medidas de estrutura em grande escala com os mapas do SDSS de galáxias, quasares e gás intergaláctico tornaram-se um pilar central do modelo cosmológico padrão que descreve nossa compreensão da história e do futuro do Universo. Os dados do SDSS ajudaram a demonstrar que o Universo é dominado por matéria escura invisível e energia escura e penetrante, e semeado com estrutura por flutuações quânticas no

Universo jovem. Essas flutuações evoluíram para formar as estruturas em grande escala observadas hoje. O SDSS foi também responsável pelas primeiras medidas de oscilações acústicas de bárions (em inglês, BAO), detectadas durante a Fase I do SDSS,

Figura 9.14 – Mapa de redshifts de ~ 1.500.000 galáxias produzido com dados do SDSS DR13. Note-se as estruturas presentes no mapa, em diferentes redshifts. Fonte: http://www.sdss.org/science/.

Os mapas de alta precisão do SDSS de história de expansão cósmica usando BAO têm sido especialmente importantes na quantificação desses resultados, colocando vínculos sobre a geometria e conteúdo energético do universo. BAO foram detectados primeiramente no agrupamento de galáxias pelo SDSS-I e no 2dFGRS e, desde então, também foram detectados no gás de hidrogênio intergaláctico usando medidas de Lyman-alfa.

BAO são uma consequência das flutuações de densidade de matéria no Universo, ocorrendo em uma escala característica de ~ 150 Mpc, chamada de escala acústica, e prevista a partir das medidas das flutuações de temperatura da RCFM, e podem ser usadas como régua padrão para medir a evolução das flutuações de densidade (**Figura 9.15**). O pico acústico observado em BAO permite estimar a distância entre os redshifts z = 0,35 (distribuição da galáxias) e z = 1100 (RCFM) com uma precisão melhor do que 4% (**Figura 9.16**).

Os levantamentos apresentados nas **Figuras 9.17** e **9.18** foram feitos, respectivamente, pelos consórcios 2dFGRS e 6dFGRS, realizados pelo Observatório Anglo-Australiano, com colaboração de várias universidades inglesas e australianas, e o 2MASS, coordenado pela Universidade de Massachussets (EUA) e realizado pelo IPAC, mantido pelo JPL/NASA e pelo CALTECH.

Figura 9.15 – Representação da evolução das estruturas, com a escala característica de BAO, em 150 Mpc, marcada à esquerda. Fonte: http://www.sdss3.org/surveys/boss.php.

Figura 9.16 - Função de correlação de 2 pontos da distribuição de matéria do Universo, com um pico correspondente aos BAO em ~ 150 Mpc. Note-se a dependência do ajuste dos modelos à existência do pico de oscilação. Fonte: C. Bennett (Nature 2006).

O 2dF Galaxy Redshift Survey (2dFGRS) utilizou a instalação 2dF (do inglês, campo de 2 graus) construída pelo Observatório Anglo-Australiano. O 2dFGRS obteve espectros para ~ 245.000 objetos, principalmente galáxias, e obteve-se redshifts confiáveis para 221.000 galáxias. As galáxias cobrem uma área de aproximadamente 1500 graus quadrados selecionados do APM Galaxy Survey estendido em três regiões: uma faixa no Polo Norte Galáctico (em inglês, NGP), outra no Polo Sul Galáctico (em inglês, SGP) e campos aleatórios espalhados pela faixa SGP.

A **Figura 9.17** mostra o mapa da distribuição de galáxias produzida com os dados do 2dF ao final do projeto. Alguns dos vários resultados de impacto do 2dF foram: uma

medição precisa do espectro de potência da aglomeração de galáxias em escalas de até 300h-1 Mpc, permitindo determinações precisas da densidade de massa total do universo e da fração de bárions, medidas, em combinação com observações da RCFM, da constante de Hubble e densidade de bárions, evidência de uma constante cosmológica não-zero (energia escura) e restrições na equação de estado da energia escura; as funções de luminosidade para galáxias com diferentes tipos espectrais, tanto no campo como em clusters e a variação nas propriedades de agrupamento de galáxias como funções de luminosidade e tipo espectral.

Figura 9.17 – Distribuição das ~ 245.000 galáxias do 2dF. Note-se a presença das estruturas filamentares nos mesmos redshiffts observados nos levantamentos anteriores. Fonte: http://www.roe.ac.uk/~jap/2df/

O 6dF é uma referência para o instrumento de campo de 6 graus, um dispositivo que usa fibras ópticas e tecnologia de posicionamento robótico, aumentando poder de observação do Telescópio Britânico Schmidt do Observatório Anglo-Australiano em mais de 100 vezes sua capacidade original (**Figura 9.18**). Lembramos que o Observatório Anglo-Australiano foi responsável também pelo 2dFGRS. Dezenas de pequenos prismas de vidro do tamanho da ponta de um dedo permitem que o telescópio veja até 150 estrelas ou galáxias ao mesmo tempo - tornando 6dF a máquina final para mapear o universo próximo. O 6dF mapeou quase todo o Hemisfério Sul, observando mais de 100000 galáxias. O resultado final é uma nova maneira de ver a forma como as galáxias se aglomeram e se movem no nosso universo local, e como isso aconteceu.

Os levantamentos anteriores foram todos feitos na faixa óptica do espectro eletromagnético. Já o 2MASS (Two Micron All Sky Survey, **Figura 9.19**) opera na faixa infravermelho e, utilizando novos detectores podem agora detectar objetos astronômicos mais de 100 milhões de vezes mais fracos do que aqueles detectados nos

levantamentos anteriores. Além de fornecer um contexto para a interpretação de resultados obtidos em infravermelho e outros comprimentos de onda, o 2MASS está fornecendo respostas diretas a perguntas imediatas sobre a estrutura em larga escala da Via Láctea e do Universo Local.

Figura 9.18 – Distribuição das galáxias com $z \leq 1$ (~2 milhões de anos luz), no Hemisfério Sul, medidas pelo 6dF Galaxy Redshift Survey. O mapa contém 136.304 galáxias e mostra, claramente, a distribuição de estruturas no Universo próximo e uma rarefação à medida que o *redshift* aumenta, na direção das bordas da esfera. Fonte: http://www.mso.anu.edu.au/2dFGRS/.

Figura 9.19 – Foto do levantamento de galáxias 2MASS (2 Micron All Sky Survey) contendo cerca de 1,6 milhões de galáxias em todo o céu. As galáxias mais brilhantes e mais próximas são representadas em azul, e as mais fracas, as mais distantes estão em vermelho. A faixa escura nesta imagem mostra a área do céu onde a nossa Via Láctea galáctica bloqueia a nossa visão de objetos distantes, que, nesta projeção,

situa-se predominantemente ao longo das bordas da imagem. (Fonte: IPAC/Caltech).

O 2MASS digitalizou todo o céu em três bandas de infravermelho próximo para detectar e caracterizar fontes pontuais mais brilhantes do que cerca de 1 mJy em cada banda, com relação sinal / ruído (SNR) maior que 10, utilizando dois telescópios automatizados de 1,3 m, um no Monte Hopkins (Arizona, EUA) e um no CTIO (Cerro Tololo, Chile). O 2MASS Norte começou as operações de rotina em junho de 1997 junho e o 2 MASS Sul, em março de 1998, operando até fevereiro de 2001.

A Universidade de Massachusetts (EUA) foi responsável pelo gerenciamento geral do projeto e pelo desenvolvimento de câmeras infravermelhas e sistemas de computação no local em ambas as instalações. O Centro de Processamento e Análise de Infravermelhos (IPAC) é responsável por todo o processamento de dados através do Pipeline de Produção e construção e distribuição dos produtos de dados. O 2MASS envolve a participação de membros de diversas instituições, tendo sido financiado pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) e pela National Science Foundation (NSF).

Os benefícios científicos imediatos da pesquisa 2MASS incluem o primeiro censo fotométrico de galáxias mais brilhante do que 13,5 magnitudes. O catálogo de mais de 1.000.000 de galáxias fornecerá medições fotométricas em três comprimentos de onda e alguns parâmetros estruturais para grandes amostras de galáxias em diferentes ambientes, e permitirá procurar objetos raros, frios e extremamente vermelhos (por exemplo, estrelas de luminosidade extremamente baixa e anãs marrons) ou muito obscurecidos em comprimentos de onda ópticos (por exemplo, AGNs e aglomerados globulares obscurecidos por poeira Localizado no plano Galáctico).

9.5 O SETOR ESCURO

9.5.1 MATÉRIA ESCURA

Na década de 80, os astrônomos observaram um fato bastante estranho ao estudar as curva de rotação das galáxias espirais. A **Figura 9.20** mostra a curva de velocidade de rotação devida ao disco, gás e halo da nossa Galáxia, em azul, e a curva teórica, prevista pelas Leis de Kepler. Devido à grande diferença observada entre a curva da galáxia e a curva do disco, foi levantada a hipótese que o halo continha muito mais matéria do que o imaginado e que essa matéria somente sofria a ação da gravidade, não emitindo nenhum tipo de radiação eletromagnética. Daí o nome "MATÉRIA ESCURA".

Podemos mostrar a curva de rotação de uma galáxia espiral deve variar em função da posição do elemento de massa com a distância até o centro. A relação entre a energia

potencial gravitacional e a energia cinética de um elemento de matéria a uma distância r do centro da Galáxia, de acordo com a 2ª lei de Newton, é dada por:

$$G\frac{Mm}{r^2} = m\frac{V^2}{r}$$

determinando, a partir daí, uma relação para a massa contida dentro de uma esfera de raio R:

$$M = \frac{rV^2}{G}$$

o que sugere que, a velocidade deve aumentar proporcionalmente à massa e, fora dos limites do objeto, cair rapidamente a zero. A **Figura 9.20** nos mostra algo completamente diferente. A curva combinada com toda a massa da Galáxia (azul) deveria cair como a curva do disco, caso a matéria do halo fosse desprezível em relação à massa do disco, que é o que se supõe para gerar a curva vermelha.

Figura 9.20 – Curva de velocidade radial da nossa Galáxia, uma espiral. A curva azul é a combinação das curvas de disco, gás e halo e esperava-se que ela decrescesse para raios maiores que 20 ou 30 kpc, conforme a curva vermelha, de acordo com as leis de Newton (Fonte: http://astro.if.ufrgs.br).

Entretanto, nota-se claramente que a velocidade do halo também cresce e, para raios maiores que os raios determinados por meio de observações ópticas, tende à velocidade de toda a Galáxia, conforme vemos na **Figura 9.21**. As estimativas dinâmicas (via leis de Newton) dessa matéria não-luminosa ("escura") indicam que ela é quase 10 vezes maior que a quantidade de matéria bariônica, como pode ser visto na Tabela 9.1.

Sabemos que também existe matéria escura bariônica em anãs negras, nuvens moleculares frias ("escuras") e outros objetos que não emitem luz visível. A resposta é que sempre será possível tentar medir esses objetos feitos de bárions por meio da

emissão infravermelho ou rádio. Quanto à matéria não-bariônica, ela somente pode ser percebida através de efeitos da gravidade; pois não emite radiação eletromagnética. Para ela existem diversos candidatos, entre eles o neutrino, que é o mais conhecido. A matéria escura é responsável por cerca de 23% de toda a densidade do Universo e concluímos então que, mesmo falando somente de matéria, somos constituídos de matéria que é a exceção do que existe no Universo. Em outras palavras, praticamente desconhecemos de que tipo de matéria o Universo é feito...

Figura 9.21 – Curva de velocidade radial da nossa Galáxia espiral. Acredita-se que a diferença entre as curvas é causada pela presença de matéria escura (Fonte: http://astro.if.ufrgs.br).

9.5.2 ENERGIA ESCURA

A energia escura é uma grandeza ainda mais complicada de definir, porque simplesmente não sabemos o que ela é ou como medi-la. Pode-se dar a ela diversos significados, todos mais ou menos relacionados com um termo conhecido como Constante Cosmológica, colocado por Einstein nas equações da Relatividade Geral para garantir que suas equações descreviam um Universo real. Naquela época supunha-se que o Universo continha somente matéria comum e radiação e, devido ao tamanho estimado, a contribuição da matéria para a densidade total era muito maior do que a da radiação. Daí a ideia de que vivíamos num Universo não-relativístico e sem pressão. A constante introduzida por Einstein contrabalançaria a atração gravitacional exercida pela matéria não-relativística e garantia que o Universo não se contrairia, mantendo a situação estática.

Entretanto, a introdução de uma constante para balancear as observações da época era algo que desagradava bastante Einstein, devido à "quebra da beleza formal da teoria".

Além disso, uma constante para garantir o equilíbrio nas condições em que foi introduzida criava um equilíbrio instável no Universo modelado pelas equações de Einstein. Como a constante não dependia de nenhuma partícula, caso houvesse um pequeno desequilíbrio e o Universo ficasse ligeiramente maior, ela superaria a densidade de matéria, uma vez que esta depende do volume (que aumentaria um pouco). Esse processo se alimentaria e haveria uma expansão acelerada. Caso contrário, seguindo o mesmo raciocínio de a densidade de matéria aumentar com o decréscimo do volume, o Universo seguiria rapidamente para um colapso.

Porém, em 1929, Hubble mostrou que o Universo estava em expansão e Einstein pode descartar a Constante Cosmológica. Ela voltou à moda algumas vezes durante o séc XX, para reconciliar problemas relativos à idade do Universo e reapareceu em grande estilo no final do séc. XX, quando os grupos de Saul Perlmutter e colaboradores (Supernova Cosmology Project) e de A. Riess e colaboradores (High-z Supernova Search Team), estudando supernovas tipo I, localizadas a centenas de milhões de anos-luz da Terra, independentemente encontraram resultados que só poderiam ser explicados supondo-se que o Universo estava sofrendo um processo de aceleração. A importância do resultado obtido por ambos os grupos e sua relevância para a Cosmologia resultou no Prêmio Nobel de Física de 2011.

A **Figura 9.22** mostra os resultados de ambos os grupos, comparando o fluxo (ou diferença de magnitudes m-M) em função da distância (z). Caso o Universo não sofresse aceleração, esse fluxo deveria decrescer proporcionalmente ao quadrado da distância. Para um dado valor de z, um universo acelerado fornece magnitudes com fluxos menores (distâncias reais maiores) do que um universo desacelerado. Ao olhar os dados utilizados para produzir a **Figura 9.22**, ambos os grupos concluíram que a aceleração explicava o fato que as supernovas observadas em *redshift* $z \sim 0{,}5$ eram, em média, 0,25 magnitudes mais fracas do que deveriam ser, caso o Universo não estivesse se expandindo de forma acelerada.

Uma questão que sempre perturbou os físicos desde que a existência de Λ foi proposta é o sentido físico que ela deveria ter. Em outras palavras, que componente do Universo poderia manter a densidade de energia constante durante a expansão (ou contração)? A resposta mais aceita atualmente – não necessariamente a única – é que a energia do vácuo pode representar esse papel. Essa energia vem de uma consideração quântica, ligada ao princípio da incerteza de Heisenberg, que permite que um par de partícula e antipartícula possa ser criado do vácuo. Esse processo de criação ou aniquilação não depende da expansão ou contração do Universo.

O principal problema com essa associação é que, se calcularmos a densidade de energia do vácuo a partir de considerações de mecânica quântica, temos um problema sério: essa energia é da ordem de 10^{133} eV/m^3. Isso é **124 ordens de magnitude maior** do que

a densidade crítica do Universo e representa uma discrepância absurda entre teoria e observação. Ainda não sabemos quase nada sobre a energia do vácuo e esta é uma área em que astrônomos podem ajudar bastante os físicos de partículas, pois estudando o Universo nas maiores escalas conhecidas, estamos indiretamente examinando a estrutura do vácuo em escalas muito pequenas. O estudo da Energia Escura, sua origem e propriedades é um dos tópicos mais ativos e interessantes na Cosmologia hoje.

Figura 9.22 – Diagrama de fluxo (m-M) x distância para supernovas tipo I observadas pelos grupos de Perlmutter e Riess. O painel inferior mostra a diferença entre os dados e as previsões de modelo com Λ=0 e Ω_M= 0,3. Fonte: http://www.cfa.harvard.edu/oir/Research/supernova/HighZ.html.

9.6 O UNIVERSO HOJE

A combinação dos resultados observacionais discutidos nas seções anteriores constituem hoje o conjunto de informações mais detalhado e importante para estudar a origem e a evolução do Universo. As medidas da RCFM, da distribuição de supernovas tipo I distantes, de BAO, dos objetos distantes com linhas Lyman alfa e os levantamentos de *redshifts*, combinados, mostram um quadro bastante completo das propriedades do Universo. Medidas separadas fornecem intervalos de valores maiores

para os parâmetros cosmológicos, enquanto a combinação de duas ou mais estreitam os intervalos de possibilidades.

A **Tabela 9.1** apresenta os valores dos principais parâmetros cosmológicos, obtidos a partir de uma análise combinada entre os resultados mencionados e os principais componentes da densidade de matéria e energia estão representados na **Figura 9.23**. Isso nos permite concluir, conforme mencionado na Seção 9.6, que a combinação da matéria ordinária, Matéria Escura e Energia Escura indicam uma geometria Euclidiana para o Universo e que 96% de sua composição, constituída pela Matéria Escura e pela Energia Escura, é desconhecida.

TABELA 9.1 – VALORES DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS COSMOLÓGICOS (FONTE: ADE ET AL., PLANCK COLLABORATION 2016)

Parâmetro cosmológico	Valor (a)	Valor (b)
Densidade total Ω_t	1,02±0,02	1,02±0,02
Densidade de bárions Ω_b	0,0484±0,0002	0,0483±0,0002
Densidade de matéria escura Ω_{CDM}	0,258±0,002	0,257±0,001
Densidade de matéria escura Ω_M	0,308±0,012	0,306±0,007
Densidade de energia escura Ω_Λ	0,692±0,012	0,694±0,007
Constante de Hubble H_0 (km/s.Mpc)	67,800±0,009	67,900±0,006
Índice espectral das flutuações n_s	0,968±0,006	0,968±0,004
Profundidade óptica na recombinação	0,066±0,016	0,067±0,013
Sigma 8	0,815±0,009	0,815±0,009
Redshift da reionização z_{rei}	8,8±1,6	8,8±1,6
Idade do Universo t_0 ($x10^9$ anos)	13,80±0,02	13,80±0,02
Época do desacoplamento t_{dec} ($x10^3$ anos)	377,7 ± 3,2	377,7 ± 3,2
Redshift do desacoplamento z_{dec}	1090,09±0,42	1090,09±0,42
Temperatura da RCFM (K)	2,726±0,001	2,726±0,001

(a) Somente usando dados do satélite Planck; (b) Planck + medidas do parâmetro de Hubble, de BAO e de supernovas tipo I.

Figura 9.23– Distribuição percentual dos componentes de matéria e energia no Universo.

Com relação ao mecanismo de expansão, devido à presença da energia escura, sabemos que o Universo, apesar de plano e com densidade de matéria menor que a densidade crítica, possui uma densidade de energia que, além de complementar o balanço de densidades para garantir um Universo plano, ainda é responsável pela aceleração do processo de expansão. Assim, em termos dinâmicos, podemos dizer que o Universo atual é plano e, ao invés de ter a expansão gradualmente freada pela gravidade da matéria existente, a expansão é dominada pela presença da energia escura, causando uma aceleração da expansão.

9.6.1 A GEOMETRIA E EVOLUÇÃO DO UNIVERSO

A questão do futuro do Universo está ligada, diretamente, à quantidade de matéria que o Universo possui. A combinação da matéria comum (prótons, nêutrons, elétrons e neutrinos), matéria e energia escura determina não só a dinâmica do Universo (expansão retardada ou acelerada), mas também a geometria (casos em que ele é aberto, fechado ou plano). A combinação de matéria ordinária, matéria escura e energia escura definem a geometria do Universo e, consequentemente, o destino do Universo.

Igualando-se as energias cinética e potencial do Universo, considerando que a velocidade da expansão é dada pela Lei de Hubble e considerando a densidade de matéria e energia do Universo, podemos escrever:

$$\Omega_{crit} = \frac{8\pi G\rho}{3H_0^2} \approx 10^{-29} g.cm^{-3}$$

em que G é a constante de gravitação, ρ é a densidade de matéria-radiação do Universo, H_0 é a constante de Hubble e Ω_{crit} é a densidade crítica do Universo. 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 tem intensidade suficiente para reverter esse processo de expansão, fazendo com que o Universo, eventualmente, termine em uma grande contração

Já o destino do Universo é determinado pela sua densidade, geometria e taxa de expansão. Resultados dos satélites COBE, WMAP e Planck, bem como de observações de aglomerados de galáxias nos levantamentos descritos na seção 9.3.2, sugerem que o Universo é plano, ou seja, que a geometria que descreve as grandes escalas é a chamada geometria "Euclidiana", nossa velha conhecida. Densidades diferentes definem geometrias esféricas ou hiperbólicas.

Na ausência de uma constante cosmológica ou termo equivalente, nas equações de Friedmann, podemos dizer que a densidade define a geometria e, por conseguinte, o destino do Universo. Finalmente, diversas observações indicam que a constituição do

Universo é praticamente desconhecida, com propriedades bastante estranhas. Na verdade, a composição química de cerca de 96% do Universo é desconhecida. Dividimos essa parte desconhecida entre matéria e energia escuras e, para conhecer o destino do Universo – e, em consequência, também o nosso – é necessário determinar o que são esses componentes e como eles influenciam na dinâmica do Universo.

Uma das formas de identificação dessa geometria é simplesmente olhar os ângulos dos triângulos representados sobre as superfícies: geometrias fechadas ou esféricas têm a soma maior que 180°; geometrias abertas ou hiperbólicas tem a soma menor que 180° enquanto a plana, ou Euclidiana, é a que normalmente nos lembramos, em que a soma é igual a 180° (**Figura 9.24**).

Figura 9.24 – Comparação das diferentes geometrias no Universo (aberta, plana e fechada) e seu efeito na distribuição angular de temperaturas da RCFM.

A geometria define a dinâmica do Universo. Essa força depende da densidade média de matéria-energia no Universo. A densidade de matéria atual do Universo não é suficiente para interromper a expansão (= 0,23 Ω_0) e, pensando somente em termos de matéria, a geometria seria aberta e o Universo se expandiria para sempre. Entretanto, a densidade de energia escura, que funciona como uma pressão negativa e é responsável pela

expansão acelerada do Universo, contribui para a densidade total, fazendo com que $\Omega_0=\Omega_T/\Omega_{crit}=1$.

Se a densidade total fosse maior que a densidade crítica, ρ_c, a expansão seria interrompida e o movimento se inverteria, conduzindo o Universo a um colapso, ou *Big Crunch*. Para valores menores que ρ_c a expansão aconteceria eternamente. Conforme foi discutido 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 cerca de 7 – 8 vezes maior do que a quantidade de matéria normal.

9.6.2 O FUTURO DO UNIVERSO

Ao longo desse texto ressaltamos um fato notável: toda a dinâmica da evolução do Universo obedece a um delicado equilíbrio de forças, uma espécie de *"cabo de guerra"* entre a força da gravidade e diversas outras forças que, em diferentes épocas da vida de um sistema planetário, de uma estrela ou 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?

Sabemos que estrelas se formam de nuvens de Hidrogênio, de modo que, 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 com as galáxias em grupos: elas "apagarão".

Juntando a isso as consequências 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. Além disso, após cerca de 10^{32} anos os constituintes básicos da matéria, feitas principalmente de prótons, devem decair, aumentando o campo de radiação e "decompondo" toda a matéria existente no Universo.

O Universo estará, então, no seu estado de energia mínima – onde não há como perturbá-los sem que mais energia seja introduzida – e de entropia máxima, caminhando para 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 consequências 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 fosse maior do que ρ_c, e supondo que vivemos num Universo que começou com uma grande explosão, teríamos um instante (não sabemos exatamente quando) em que a expansão do Universo seria interrompida e ele começaria a se contrair. A gravidade puxaria então os corpos novamente uns de encontro aos outros e, seguindo as leis da Termodinâmica, a temperatura do Universo novamente aumentaria. Com a diminuição do volume e aumento gradual da densidade, teríamos uma contração acelerada e o final desse processo seria um *Big Crunch*, com o Universo voltando a uma singularidade e levando consigo todo o espaço-tempo. O quadro atual das observações praticamente descarta essa possibilidade, mas modelos cíclicos e estacionários ainda são estudados e tem um atrativo teórico interessante, que é justificar o processo de criação contínua de matéria.

Ainda não sabemos responder se o quadro que descreve a morte térmica do Universo acontecerá exatamente desse modo. 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 os valores precisos da taxa de expansão do Universo, sua idade e composição são essenciais para entender o quebra cabeças cosmológico.

9.7 CONCLUSÃO

A Cosmologia é uma ciência que trabalha para tentar entender o conteúdo, estrutura e evolução do Universo, lidando com enormes tempos e distâncias. Ela tenta também entender como o Universo jovem 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 dos satélites WMAP e Planck, de outros experimentos que vem medindo a RCFM e resultados dos levantamentos de galáxias mencionados na seção 9.3.2 responderam algumas das questões sobre a história térmica e a evolução do Universo. Observações das estruturas em grande escala 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 já temos uma boa ideia sobre a dinâmica do Universo que nos cerca e de suas propriedades físicas mais importantes. Uma nova geração de experimentos (telescópios gigantes, satélites e experimentos cuja tecnologia teve que ser desenvolvida especialmente para eles) estão fazendo ou farão novas medidas e estudar o Universo de formas inimagináveis há 40 anos atrás. Estimativas da idade do Universo e da quantidade de matéria escura estão em andamento, com o Telescópio Espacial Hubble, diversos levantamentos de objetos em diferentes comprimentos de onda (2MASS, 2dF, 6dF SDSS, SNI, objetos Lyman-α, etc.). Vários experimentos estão em andamento para identificar candidatos à matéria escura, como os experimentos de neutrinos e WIMPS (Weak Interactive Massive Particles) KamLand, Edelweiss, Sudbury. O INPE participa ativamente de vários desses projetos, tanto para estudar a RCFM quanto no estudo de simulações de interação de galáxias. Estamos assistindo a um enorme avanço no entendimento da evolução das galáxias e das estruturas em grande escala nesta década. Ainda não sabemos exatamente qual é a natureza da matéria escura ou da energia escura, mas certamente ambas são resultado de processos que ocorreram no Universo jovem.

Os problemas principais que a Cosmologia tenta resolver são bem formulados, mas muitas das soluções têm permanecido obscuras por décadas. Finalmente, com o aumento da quantidade de informações obtidas a partir do avanço dos experimentos, computadores e o consequente avanço da teoria, parte das questões fundamentais aqui apresentadas começam a ser resolvidas. Vários dos pesquisadores da DAS estão diretamente envolvidos nessa corrida ao conhecimento e estão trabalhando atentos aos novos resultados que, diariamente, aparecem na literatura científica.

A primeira versão dessa monografia, escrita em 1998, continha diversas informações conflitantes com o conteúdo atual e algumas questões formuladas nas décadas de 80 e 90 que foram respondidas recentemente pelos resultados do satélite WMAP (2003 e 2006) e pelos levantamentos de objetos distantes (diversos resultados em 2004, 2005 e 2006).

A segunda versão, escrita em 2006, apresentou diversas atualizações de resultados e algumas novidades nas estimativas de parâmetros cosmológicos, mas ainda não conteve resultados significativamente diferentes da versão de 1998. As questões em aberto sobre a polarização tensorial da RCFM, uma explicação teoricamente bem fundamentada e comprovada observacionalmente sobre a origem da Energia Escura e a identificação definitiva do(s) constituinte(s) da Matéria Escura ainda aguardam respostas nessa versão de 2017.

Se uma monografia sobre esse mesmo tema for escrita daqui a 10 anos, temos certeza que ela será ainda mais distinta das que foram escritas em 1998 e 2006, no que diz respeito aos problemas fundamentais que a Cosmologia pretende resolver.

9.8 REFERÊNCIAS

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.

- "O despertar da Via Láctea". **Thimothy Ferris**. Ed. Campus, 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.

- "A Brief History of Time". **Stephen Hawking**. Um dos livros mais divulgados sobre Cosmologia, lamentavelmente muito mal traduzido para o português, sob o título "Uma breve história do tempo". Texto muito interessante, por mostrar a visão de Universo de um dos grandes físicos da segunda metade do século XX.

- "Shadows of Creation: Dark Matter and the Structure of the Universe". **Michael Riordan e David Schramm**. W. H. Freeman and Co., New York, 1991. Texto de divulgação científica, de um dos especialistas em nucleossíntese primordial, busca transmitir os conceitos básicos do processo de formação de estruturas e da existência de matéria escura no Universo.

- "A radiação cósmica de fundo e a formação de estrutura em larga escala no Universo: uma visão atual". **Carlos Alexandre Wuensche**. Revista *Humanidades*, **38**:142-151, 1994. Ensaio sobre o problema da formação de estruturas no Universo, escrito para uma revista basicamente voltada para um público de ciências humanas.

- "Os Três Primeiros Minutos". **Steven Weinberg**. Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 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), com um apêndice matemático relativamente simples...

- "O Big Bang". **Joseph Silk**. Editora UnB, 2a. ed., 1989. Um dos papas da área, Joseph Silk 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.

- "Foundations of Astronomy". **Michael Seeds**. Wadsworth Publising Co., 1997. Livro texto de introdução à astronomia, com textos claros e excelentes ilustrações.

- "O Universo inflacionário". **Alan Guth**. Editora Campus, 1997. Texto excelente escrito por um dos criadores do modelo inflacionário.

- "O passado e o presente do Cosmos". Scientific American Brasil, Ed. Especial, no. 1, Setembro 2003.
- "O que é Cosmologia". **Mario Novello**. Editora Zahar, 2006

Os artigos abaixo são mais técnicos, escritos em inglês, mas com uma excelente quantidade de informação atualizada.

- "Connecting Quarks to Cosmos: Eleven Science Questions for the New Century". Committee on the Physics of the Universe, National Research Council. National Academic Press, 2003.
- "Beyond ΛCDM: Problems, solutions, and the road ahead". Philip Bull et al. ArXiv:1512.05356v2 (2015).
- Challenges in Cosmology from the Big Bang to Dark Energy, Dark Matter and Galaxy Formation". Joseph Silk. ArXiv:1611.09846v2 (2016).
- "The Cosmological Parameters". O. Lahav e A. Liddle, Review of Particle Physics (2016).

Capítulo 10

ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS*

Odylio Denys Aguiar**

*Primeira versão Maio/2018.

** e-mail: odylio.aguiar@inpe.br

Credit: NSF/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet

ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS

LISTA DE FIGURAS 10-4

LISTA DE TABELAS 10-5

10.1 O QUE SÃO ONDAS GRAVITACIONAIS? 10-6

10.2 COMO PODEMOS DETECTAR/OBSERVAR ONDAS GRAVITACIONAIS? 10-8

10.2.1 PROVA DE QUE ELAS EXISTIAM 10-11

10.2.2 MÉTODOS DE DETECÇÃO E DETECTORES DE ONDAS GRAVITACIONAIS 10-13

10.3 FONTES ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS 10-18

10.4 A ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS FOI INAUGURADA! 10-19

10.5 O QUE APRENDEMOS COM AS PRIMEIRAS ONDAS GRAVITACIONAIS OBSERVADAS? 10-22

10.6 QUAL O FUTURO DA ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS? 10-27

10.7 BIBLIOGRAFIA 10-30

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 10.1 - NA TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL DE EINSTEIN, AS MASSAS, PRINCIPALMENTE AS GRANDES, CAUSARIAM DEFORMAÇÃO NO ESPAÇO-TEMPO, DE FORMA SEMELHANTE À DEFORMAÇÃO CAUSADA POR UMA BOLA DE BOLICHE EM UM COLCHÃO DE BORRACHA.....10-8

FIGURA 10.2 - DEFORMAÇÃO DE UM CÍRCULO DEVIDO A FORÇAS INDUZIDAS POR ONDAS H+ OU H× PURAS 10-9

FIGURA 10.3 - ONDAS GRAVITACIONAIS DE GW150914 10-20

LISTA DE TABELAS

TABELA 10.1 - PARÂMETROS DOS EVENTOS ENVOLVENDO PARES DE BURACOS NEGROS (A-L É ANOS-LUZ).....**10-22**

TABELA 10.2 - PARÂMETROS DO EVENTO GW170817 (A-L É ANOS-LUZ).....**10-24**

10.1 O QUE SÃO ONDAS GRAVITACIONAIS?

O conceito de ondas gravitacionais só pode ser entendido à luz da teoria da relatividade geral de Albert Einstein. Sem ela não podemos entender o que são ondas gravitacionais. Mas vamos explicar isto melhor mais adiante.

Comecemos com a teoria da gravitação de Isaac Newton, publicada no livro "Principia" em 1687. Para Newton a gravidade era uma força invisível que agia à distância, proporcional ao produto das duas massas, que se atraíam, e ao inverso do quadrado da distância entre elas. Esta lei da gravitação, como ficou conhecida, não dizia nada sobre a velocidade de propagação da força gravitacional. Aliás, este foi um assunto de debate por mais de dois séculos: qual seria a velocidade de propagação da força da gravidade? O próprio Newton não tinha certeza da resposta.

Hoje muitos cientistas interpretam que a lei da gravitação de Newton implicava que a velocidade de propagação da força da gravidade era infinita e, portanto, segundo esta lei, se uma massa mudasse a sua posição todo o Universo receberia esta informação instantaneamente. Porém, isto não parece correto. Se no lugar de conhecermos todas as equações de Maxwell, conhecêssemos apenas a lei de Coulomb para as cargas elétricas, também seríamos levados a pensar, erroneamente, que a força elétrica se propagava instantaneamente. A lei da gravitação é para a gravitação o mesmo que a lei de Coulomb para o eletromagnetismo, um pedaço do todo, não a teoria completa. De posse de todas as equações de Maxwell, podemos provar que as ondas eletromagnéticas existem e elas, assim como a força elétrica e a força magnética, se propagam com a velocidade da luz. Também podemos provar o mesmo para a gravitação, mas para isto foi necessária uma teoria mais completa que a teoria de Newton, foi preciso a teoria da relatividade geral de Einstein.

Einstein foi o primeiro cientista a perceber que nenhuma informação poderia viajar à velocidade maior que a da luz. Ele percebeu isto já na sua teoria da relatividade especial, publicada em 1905. Como consequência deste limite de velocidade para todas as coisas, Einstein percebeu também que o espaço não era independente do tempo, mas formava com ele uma entidade que ele chamou de espaço-tempo. Por que ele concluiu isto? Muito simples. Imagine que você está viajando em um foguete com velocidade

próxima da velocidade da luz e que um colega ou uma colega sua esteja em outro foguete também com velocidade próxima da velocidade da luz, porém em direção oposta, se aproximando de você. Segunda a teoria da relatividade especial, a velocidade relativa entre os dois foguetes é a velocidade da luz, e não duas vezes a velocidade da luz. Ora, para conciliar esta mágica matemática o espaço precisa estar ligado ao tempo e vice-versa. Quanto maior a velocidade do referencial, mais o espaço se contrai e o tempo se dilata. Se você tivesse um irmão ou irmã gêmea e viajasse naquele foguete por muito tempo, quando voltasse à Terra, o seu irmão ou irmã, já estariam velhinhos e você não teria envelhecido quase nada. Este efeito é real, o sistema GPS para funcionar direito vive corrigindo os tempos dos satélites em relação ao tempo na Terra, porque os satélites estão com velocidades maiores. Mas o mais surpreendente Einstein ainda estava por descobrir.

Se você acha que a velocidade da luz ser a velocidade limite para todas as coisas ou que o tempo estar ligado ao espaço são conceitos estranhos e difíceis de acreditar, você nem imagina o que Einstein descobriu 10 anos depois, com a sua teoria da relatividade geral, publicada em 1915. Ele descobriu que quando o espaço-tempo se curvava (entortava), ele produzia o efeito gravitacional, ou seja, ele descobriu a origem da gravitação. Dessa forma, os corpos com massa não se atraíam por causa de uma força invisível, mas sim porque eles sentiam o espaço-tempo em volta deles curvo e, portanto, "escorregavam" um em direção ao outro. É como você imaginar uma bola de boliche em cima de um colchão de borracha (FIGURA 10.1). O peso dela deforma o colchão, de maneira que as bolas menores (de bilhar) sentem esta deformação e "escorregam" em direção à bola de boliche.

Agora para explicar as ondas gravitacionais fica fácil. Imagine duas estrelas orbitando uma em torno da outra. Cada uma delas deforma o espaço-tempo em volta dela, mas como elas estão em órbita, uma em torno da outra, elas carregam estas deformações com elas. Neste momento acontece uma coisa diferente. Se as deformações ficassem paradas, nada aconteceria, mas estando em movimento elas se propagam para fora, da mesma forma que não conseguimos evitar que as ondas produzidas pela queda de uma pedra na superfície de um lago se propaguem em todas as direções, para fora do ponto da queda. Einstein batizou estas deformações se propagando para fora dos corpos em órbita, que as produziram, de ondas gravitacionais. Ele descobriu isto em 1916, a partir

das equações da sua teoria da relatividade geral. Também a partir destas equações, ele provou que estas ondas se propagam também à velocidade da luz.

Figura 10.1: Na teoria da Relatividade Geral de Einstein, as massas, principalmente as grandes, causariam deformação no espaço-tempo, de forma semelhante à deformação causada por uma bola de boliche em um colchão de borracha.

Alguns cientistas, como Oliver Heaviside, Lorentz e Poincaré, depois da confirmação por Hertz da existência das ondas eletromagnéticas, já haviam suspeitado e, em alguns casos afirmado, que a velocidade da força da gravidade era a mesma que a da luz, mas foi Einstein que conseguiu provar matematicamente que isto era verdade.

10.2 COMO PODEMOS DETECTAR/OBSERVAR ONDAS GRAVITACIONAIS?

Em 1918, Einstein descobriu, a partir da sua teoria da relatividade geral, que as ondas gravitacionais são produzidas quando existe uma variação do momento de quadrupolo de massa de um objeto ou sistema e que, por causa disto, devem apresentar duas polarizações fundamentais lineares, chamadas de polarizações mais (+) e cruzada (×), a partir das quais todas as outras polarizações podem ser obtidas. Polarização em uma

onda gravitacional é mais ou menos a forma como ela oscila no espaço. Vamos explicar isto melhor. Suponha que uma onda gravitacional esteja se deslocando ao longo do eixo z, no sentido z+ (FIGURA 10.2), perpendicular ao plano xy. A polarização mais (+) causaria uma circunferência de partículas teste (no formato de um bambolê) oscilar de forma a se esticar e contrair nas direções perpendiculares x e y. Já a polarização cruzada (×) faria a circunferência de partículas oscilar no plano perpendicular ao eixo z, mas com contrações e elongações em direções formando ângulos de 45° com os eixos x e y.

Figura 10.2: Deformação de um círculo devido a forças induzidas por ondas h+ ou h× puras.

Poderíamos definir uma amplitude h para a onda gravitacional como sendo a razão entre a deformação espacial ! L que ela causa num determinado comprimento L, sobre este

comprimento L, ou seja, h = ! L / L. Note que esta amplitude, como foi definida, é adimensional (sem dimensão). Esta amplitude h seria uma composição das duas amplitudes das polarizações mais e cruzada.

$$h = ! \quad L/L = ((h_+)^2 + (h_\times)^2)^{1/2}$$

(Equação 10.1)

Uma onda, com uma determinada amplitude e polarização, poderia ser decomposta nas duas polarizações lineares puras mais (+) e cruzada (×), com amplitudes que satisfizessem a equação acima e fases que pudessem compor a polarização da onda original. Para o caso especial, no qual a diferença de fase entre as duas polarizações lineares puras é de 0°, a polarização formada ainda é uma polarização **linear**, mais o ângulo que as contrações e elongações formam com os eixos x e y vai depender das amplitudes das duas polarizações puras. Se as amplitudes forem iguais, o ângulo será de 22,5°. Se as amplitudes forem diferentes, o ângulo vai ser mais próximo da polarização linear pura que tiver a maior amplitude.

Para um outro caso especial da diferença de fase entre as polarizações lineares mais (+) e cruzada (×) ser de 90° e elas terem a mesma amplitude, a polarização resultante será **circular**, e veremos a circunferência de partículas passar a ter o formato de uma elipse em rotação no plano x-y (perpendicular a z).

No caso geral, de um ângulo diferente de 0°, 90°, 180° e 270° e amplitudes quaisquer, a polarização é a **elíptica**, que corresponde as partículas teste descreverem uma elipse em rotação, cuja excentricidade estaria variando à medida que a elipse rodasse.

As ondas gravitacionais que chegassem à Terra produzidas por um sistema binário composto por dois buracos negros ou estrelas de nêutrons, por exemplo, apresentariam polarização linear, circular ou elíptica, se o sistema estivesse orientado "edge-on", "face-on", ou em qualquer outra orientação diferente destas duas, respectivamente.

Bom, então, a conclusão é que se uma onda gravitacional passasse por nós, ela iria provocar um contração e elongação dos nossos corpos, de forma que uma hora ficaríamos baixinhos e gordos e outra hora ficaríamos altos e magros. Nisto você se perguntaria: eu não sinto nada disto, portanto, estas ondas não devem existir!

Não, as ondas existem sim, a explicação é que ela tem uma amplitude muito, muito, muito pequena. Uma onda gravitacional gigantesca, digamos uma onda "tsunami" com

amplitude $h \sim 10^{-18}$, raríssima, que ocorre a cada ~100 anos, que passasse por nós, não conseguiria mudar a nossa altura mais do que a milésima parte do diâmetro de um próton! Portanto, felizmente as ondas gravitacionais não vão causar nenhuma dor nos nossos corpos, por mais fortes que elas sejam. Por outro lado, infelizmente, elas são muito difíceis de serem detectadas, por causa das amplitudes tão pequenas que possuem. Só com instrumentos muito sensíveis, construídos com altíssima tecnologia, é que foi possível detectá-las.

10.2.2 PROVA DE QUE ELAS EXISTIAM

Muito antes de conseguirmos detectar ondas gravitacionais, a comunidade científica da área de relatividade geral e gravitação já tinha certeza de que elas existiam. Primeiro houve um convencimento do ponto de vista teórico e depois um do ponto de vista observacional, apesar de indireto.

O convencimento do ponto de vista teórico não ocorreu quando Einstein propôs a existência das ondas gravitacionais em 1916, mas sim meio século depois. Durante cinco décadas ocorreu um debate teórico na comunidade científica especializada em relatividade geral e gravitação a respeito da existência física das ondas gravitacionais. Muitos achavam que as ondas gravitacionais eram apenas um artifício matemático derivado da teoria da relatividade geral, sem existência real física. O próprio Einstein chegou a duvidar que elas fossem reais. Ele quase publicou um artigo na década de 30 negando a existência dessas ondas. Felizmente o trabalho dele foi modificado antes da publicação, graças ao cientista encarregado para julgar o trabalho, H. P. Robertson, que não concordou com Einstein. Porém, Einstein, até a sua morte em 1955, não tinha certeza se afinal as ondas gravitacionais que ele tinha derivado a partir da sua teoria da relatividade geral tinham realmente existência física.

Somente na década de 60, que trabalhos foram publicados demonstrando que ondas gravitacionais realmente carregavam energia e, portanto, teriam existência física. Entretanto, sempre continuaram a existir alguns céticos (até hoje).

A prova observacional da existência de ondas gravitacionais ocorreu na segunda metade da década de 70. Russell Hulse e Joseph Taylor descobriram em 1974 um sistema

binário formado por duas estrelas de nêutrons, das quais uma delas era um *pulsar*. Uma estrela de nêutrons é um objeto astrofísico formado principalmente por nêutrons, que tem um diâmetro de aproximadamente 20 km e uma massa um pouco maior que a do Sol. Um *pulsar* é uma estrela de nêutrons que apresenta o produto do campo magnético com a rotação suficientemente alto para emitir um feixe de rádio capaz de ser detectado na Terra, se este feixe "varrer" o nosso planeta na rotação da estrela, da mesma forma como o facho de luz de um farol "varre" o nosso rosto.

O feixe de rádio era detectado pelo radiotelescópio de Arecibo, em Porto Rico, aquele mesmo radiotelescópio do filme "Contato". Como o *pulsar* tinha uma rotação extremamente regular, conhecia-se o seu período de rotação com 14 casas decimais significativas (o seu período era de 0,059029997929613 s)! Dessa forma, Hulse pode observar a variação da chegada dos pulsos do pulsar à medida que este orbitava a outra estrela de nêutrons, graças ao efeito Doppler. Quando o *pulsar*, durante a órbita, se aproximava da Terra, os pulsos chegavam em intervalos menores que aquele período do *pulsar*. Quando ele se afastava, o contrário ocorria, os pulsos se intervalavam de um tempo maior que o período do *pulsar*. Ficava claro que esta sequência se repetia, e, logicamente, o período dessa repetição cíclica era o outro período, o período da órbita do *pulsar* em torno da sua estrela de nêutrons companheira. Era o primeiro sistema binário formado por duas estrelas de nêutrons descoberto. Outros sistemas como este seriam descobertos anos depois. Porém, o mais interessante estava para ser descoberto. Taylor continuou a medir o período orbital desse sistema nos anos que se seguiram e os resultados mostravam que este período estava diminuindo, na mesma proporção prevista pela teoria da relatividade geral em razão da emissão de ondas gravitacionais pelo sistema binário. Já em 1979, havia dados suficientes para ficar clara esta concordância. Taylor continuou a fazer as contas nos anos seguintes e, finalmente, em 1993, a Academia Sueca deu a eles (Hulse e Taylor) o prêmio Nobel de Física, por causa desta descoberta. As ondas gravitacionais não estavam sendo detectadas, mas o efeito de retirada de energia do sistema na emissão dessas ondas estava sendo observado, portanto era uma prova indireta da existência de ondas gravitacionais.

10.2.3 MÉTODOS DE DETECÇÃO E DETECTORES DE ONDAS GRAVITACIONAIS

Ora, se ondas gravitacionais retiram energia de um sistema mecânico formado por duas estrelas de nêutrons no processo de emissão, então, deveria ser possível absorver energia dessas ondas no processo inverso, o de detecção. Levando-se em conta as polarizações lineares puras das ondas gravitacionais, poderiam ser projetados detectores adequados para a detecção dessas ondas.

Foi Joseph Weber quem primeiro propôs a construção de um detector de ondas gravitacionais que poderia funcionar. A proposta dele, publicada em 1960, consistia de uma barra maciça de alumínio em formato cilíndrico, de aproximadamente 1,5 metros de comprimento e um metro de diâmetro, e de alta figura de mérito de oscilação mecânica. Esta barra era suspensa pela região central por uma haste muito fina (poucos milímetros de diâmetro) e forte, cujas duas extremidades eram presas, cada uma, a duas pilhas de blocos de aço e borracha, para amortecer as vibrações do chão do laboratório, e mantida dentro de uma câmara de vácuo de forma a deixá-la livre para oscilar, sem a influência de ruído sonoro ou sísmico. Dezenas de cristais piezoelétricos eram colados na região central da barra e conectados em série. Cristais piezoelétricos, quando deformados, produzem voltagens (eles são usados, por exemplo, em acendedores de fogão). Quando eles são conectados em série, a voltagem resultante é a soma das voltagens de todos os cristais. Mesmo para pequenas deformações da barra, causadas pela passagem de uma onda gravitacional, a voltagem resultante poderia, se não fosse tão franca, ser detectada. Esses cristais piezoelétricos faziam o papel de transdutores (sensores), que transformavam as energias vibracionais mecânicas em elétricas. Quando a onda gravitacional passasse, parte da energia da onda era convertida em energia mecânica de oscilação da barra. A conversão era maximizada se a onda chegasse perpendicular à barra e tivesse polarização mais (+), considerando que o eixo da barra estava alinhado com o eixo x (ou y). Utilizando este princípio, essas barras de Weber chegaram a ter sensibilidade para medir uma onda com amplitude adimensional h da ordem de 10^{-15}, o que, infelizmente, não foi suficiente para uma detecção, apesar de Weber ter sempre afirmado que havia detectado ondas gravitacionais em 1969.

A geração seguinte de barras foi construída a partir da década de 70. Elas eram, na sua maioria, barras com 3 metros de comprimento e 60 cm de diâmetro e eram todas resfriadas a temperaturas próximas da temperatura de ebulição do hélio líquido (4,2 K). Desta forma, o ruído térmico (Browniano) era muito menor. Para ajudar, nestas baixas temperaturas, as figuras de mérito mecânica dos sólidos (Q_m) eram bem maiores que as mesmas à temperatura ambiente, e a propriedade de supercondutividade do nióbio poderia ser utilizada para a operação dos transdutores. Desta forma, os novos transdutores puderam "aposentar" os cristais piezoelétricos que estavam sendo utilizados à temperatura ambiente. As barras criogênicas, como eram chamadas, operaram nas décadas de 80, 90 e anos 2000. Elas agora já estão todas "aposentadas" (Niobe aposentada em 2001, Allegro em 2007, Explorer em 2010, Nautilus e Auriga em 2014). Elas chegaram a sensibilidades, em uma banda de 30 Hz em torno de 900 Hz, da ordem de 10^{-21} $Hz^{-1/2}$, que para sinais *bursts* (impulsivos), em ~100Hz da banda desses detectores, correspondia a um h ~ 10^{-20}.

A terceira geração de "barras", na verdade melhor chama-las de "massas ressonantes", foram as esferas de cobre-alumínio que compunham os detectores Mini-GRAIL, construído na Holanda, e o Mario Schenberg, construído no Brasil. O princípio ainda era o mesmo, de absorção de parte da energia da onda gravitacional, agora por esferas de 68 cm e 65 cm de diâmetro, que correspondiam a 1300 kg e 1150 kg, respectivamente. O Mini-GRAIL operou até 2009 na Universidade de Leiden. O Schenberg operou no IFUSP até 2015 e encontra-se desmontando no INPE, aguardando uma oportunidade para ser remontado no laboratório de ondas gravitacionais Sérgio Ricardo Furtado, no INPE. Ambos chegaram a operar em uma banda de ~70 Hz em torno de ~ 3 kHz Hz, com sensibilidade da ordem de 10^{-20} $Hz^{-1/2}$. Maiores sensibilidades podem ser alcançadas se estes projetos tiverem continuidade. A sensibilidade de projeto é algo em torno de 10^{-22} $Hz^{-1/2}$.

Também na década de 70, foram construídos os primeiros interferômetros laser para detecção de ondas gravitacionais. De maneira semelhante a um interferômetro Micheson-Morley, os braços do interferômetro para detecção de ondas gravitacionais são horizontais e perpendiculares entre si. O princípio de detecção dos interferômetros se baseia na simples variação das distâncias relativas produzida pela passagem de uma onda gravitacional. O sinal é maximizado, quando a onda gravitacional chega

perpendicular ao plano que contém o interferômetro e com a polarização mais (+), supondo que os braços estão alinhados com as direções x e y, respectivamente. O princípio de funcionamento do interferômetro do tipo Michelson-Morley detecta esta variação de comprimento dos braços, vejamos por que: O feixe que sai do laser é inicialmente dividido em dois feixes perpendiculares, por um divisor de feixes (um espelho 50% transparente colocado em um ângulo de 45° com o feixe inicial. Cada um dos feixes divididos percorre um dos braços perpendiculares. Ao final de cada braço, esses feixes encontram espelhos 100% refletores que os enviam de volta ao ponto de partida, o divisor de feixes, que os divide novamente. Parte do feixe que voltou de um braço é juntada com parte do feixe que voltou do outro braço e enviada a um sensor de luz (fotodiodo ou fotodetector). Então, as distâncias entre os espelhos são ajustadas para que os dois feixes fiquem com fases 180° entre si (fases contrárias). Desta forma, não é registrada nenhuma luz no fotodetector. A chegada de uma onda gravitacional muda esta situação de interferência máxima, fazendo com que alguma luz seja registrada no fotodetector.

Na prática, os interferômetros LIGO, que realizaram as primeiras detecções de ondas gravitacionais, são um pouco mais complicados do que isto. Primeiro, porque os feixes de luz em cada braço não vão e voltam apenas uma vez, mas várias. Existem espelhos quase 100%, mas não exatamente 100%, que são colocados próximos do divisor de feixe, formando as chamadas cavidades de Fabry-Perot com os espelhos 100% no final de cada braço. Estes espelhos adicionais fazem com que os feixes façam várias viagens de ida e volta ao longo dos braços, acumulando uma potência em circulação nos braços que pode chegar 100 kW ou mais, apesar da fonte de laser ser de apenas algumas poucas dezenas de Watts (20 W, por exemplo). Segundo, porque existem espelhos que refletem a luz laser que tenta voltar para a fonte de laser, são os chamados espelhos de reciclagem de energia, para não desperdiçar luz laser no detector, aproveitando toda ela. E terceiro, porque também existem espelhos que ficam na frente dos fotodetectores, os chamados espelhos de reciclagem de sinal. Eles têm a finalidade de aumentar a sensibilidade do interferômetro para frequências especificas (desde que esteja dentro da faixa de sensibilidade do interferômetro), em busca de sinais periódicos nessas frequências específicas.

Os interferômetros LIGO tem braços de 4 km de comprimento e estão localizados em Livingston (Louisiana) e Hanford (Washington), nos EUA, separados cerca de 3 mil km entre si (uma onda gravitacional viajando de um sítio para o outro levaria 10 ms para fazer o percurso). O comprimento de onda do laser utilizado é de 1064 nm ou 1,064 ! m (mícron) e a faixa de frequências na qual o LIGO tem a sua maior sensibilidade é de 50Hz até 1kHz. Em torno de 200 Hz a sua sensibilidade chega a $\sim 10^{-23}$ $Hz^{-1/2}$, mas vai melhorar ainda mais. O grupo do INPE é um dos dois grupos no Brasil que participam desta Colaboração Científica LIGO (sigla LSC em inglês). Ele participa nela desde 2011. Existem ainda outros interferômetros: o Virgo, em Cascina (perto de Pisa), na Itália, com braços de 3 km, GEO600, em Hannover, na Alemanha, com braços de 600 metros, KAGRA, na mina de Kamioka, no Japão, subterrâneo, com braços de 3 km e espelhos resfriados, e um projeto de construção na Índia, o LIGO Índia.

Existem também projetos de interferometria laser no espaço tais como o LISA, DECIGO e BBO. O mais famoso deles é o *Laser Interferometer Space Antenna* (LISA), desenvolvido pela ESA e a NASA, que pretende colocar três espaçonaves em órbita do Sol, à mesma distância que a Terra se encontra dele, mas cerca de 20° atrasada em relação à órbita da Terra. Estas três espaçonaves formariam um triângulo equilátero de 2,5 milhões de quilômetros de lado. Feixes de laser de 2 W seriam enviados de cada espaçonave para as duas outras e recebido por elas por telescópios refletores. O lançamento está previsto para ocorrer antes de 2030. Uma boa parcela do sucesso desta missão já ocorreu no lançamento e funcionamento do *LISA Pathfinder*. A sensibilidade alcançada em aceleração medida ultrapassou todos os requisitos previstos para o *LISA Pathfinder* e inclusive os necessários para o LISA. Diante deste excelente desempenho e da recente detecção de ondas gravitacionais por interferometria laser, o projeto LISA recebeu várias aprovações que o colocaram novamente na previsão de lançamento e voltou a receber apoio da NASA. O LISA vai ter a sua melhor sensibilidade na faixa em frequências de 1 a 100 mHz e o DECIGO na faixa de 100 mHz a 10 Hz. O BBO (*Big Bang Observer*) também vai ter sensibilidade nessa faixa do DECIGO e pretende descobrir se o universo "nasceu" no Big Bang ou teve uma existência anterior e, neste caso, o Big Bang não existiu exatamente como descrito no modelo padrão.

Outro método de detecção de ondas gravitacionais menos conhecido é o *Pulsar timing array*. Trata-se do uso de radiotelescópios para monitorar a chegada dos pulsos dos

pulsares mais regulares que existem sendo observados. Atualmente são cerca de 40 a 50 o número de pulsares regulares que são observados. Eles são pulsares isolados, que mantem uma regularidade excepcional no seu período de rotação. Desta forma, podemos prever com precisão os momentos exatos da chegada dos seus pulsos, levando-se em conta as correções Doppler devidas à rotação da Terra em torno de si mesma e devidas à translação da Terra em torno do Sol. Comparamos, então, estes momentos teóricos previstos pelo modelo com os momentos reais observados com radiotelescópios, procurando por desvios ou resíduos, ou seja, discrepâncias entre os tempos teóricos previstos e os medidos/observados. Estes resíduos seriam indícios de que uma onda gravitacional passou pelo pulsar ou pela Terra. A maior sensibilidade destes projetos está na faixa de 10^{-9} a 10^{-8} Hz, que corresponde a período da ordem de décadas. Portanto, os 40-50 pulsares não precisam ser monitorados continuamente. Basta que observemos cada um por cerca de algumas horas a cada 6 meses.

Em 2014, o grupo do projeto *Bicep2* anunciou que havia detectado ondas gravitacionais. Infelizmente, uma análise dos dados mais detalhada mostrou que isto não havia ocorrido. Entretanto, esta metodologia de busca continua sendo utilizada até hoje. O que estes grupos buscam são indicações de polarização do modo B na radiação cósmica de fundo eletromagnética em micro-ondas. Elas seriam evidências de ondas gravitacionais na faixa de frequência de 10^{-18} a 10^{-15} Hz, que correspondem a comprimentos de onda da ordem do universo observável, teriam origem no Big Bang e no período do universo que ele sofreu a inflação e estariam registradas nos fótons que conseguiram desacoplar com a matéria quando o universo foi ficando cada vez menos denso e passou a ser transparente para estes fótons. Isto ocorreu quando o universo tinha cerca de 380 mil anos de idade, na teoria na qual ele "nasceu" no Big Bang.

Existem ainda outros métodos de detecção, porém menos explorados. Existem poucos e são pequenos os grupos tentando estes métodos. Eles procuram detectar ondas gravitacionais em frequências mais altas (acima de 100 kHz), mas como não são previstos processos físicos/astrofísicos eficientes para a produção de ondas gravitacionais nessas faixas de frequências e as sensibilidades destes detectores não são muito boas ou promissoras, estes métodos não serão mencionados nesta apostila.

10.3 FONTES ASTROFÍSICAS DE ONDAS GRAVITACIONAIS

Todas as tentativas de produção artificial de ondas gravitacionais pelo homem capazes de serem detectadas pelos detectores atuais estão condenadas ao fracasso, mesmo envolvendo energias fornecidas por bombas atômicas ou de hidrogênio. As amplitudes produzidas estão ordens e ordens de magnitude aquém do detectável.

Entretanto, existem fontes astrofísicas no universo capazes de produzir sinais tão fortes em ondas gravitacionais (variações significativas de momento de quadrupolo de massa), que mesmo estando a milhões ou bilhões de anos-luz (a-l) da Terra, os sinais poderiam ser detectados (como foram realmente).

Existem várias fontes astrofísicas de ondas gravitacionais:

- sistemas binários compactos, tais como pares de buracos negros (estelares ou supermassivos), pares de estrelas de nêutrons ou pares envolvendo um buraco negro e uma estrela de nêutrons, tanto na sua fase orbital, como na coalescência e *ring-down*;

- sistemas binários de outras estrelas (anãs-brancas e/ou estrelas comuns);

- supernovas;

- buracos negros em oscilação, por causa de algo que caiu neles;

- estrelas de nêutrons em oscilação, por causa de algo que caiu nelas;

- estrelas de nêutrons em rotação não axialmente simétrica (presença de uma "montanha", por exemplo);

- o Big Bang e o período inflacionário;

- objetos astrofísicos exóticos, cuja existência ainda não foi confirmada, tais como: cordas cósmicas, buracos negros primordiais, bolhas cósmicas, estrelas de bósons e estrelas estranhas;

- fundo cosmológico produzido por um conjunto muito grande de fontes astrofísicas (sistemas binários e supernovas, principalmente).

De todas estas fontes, as primeiras a serem detectadas forma sistemas binários de buracos negros estelas, como vamos ver na próxima seção.

10.4 A ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS FOI INAUGURADA!

Em 14 de setembro de 2015, ainda durante o período de testes de engenharia (chamado de ER8), as versões avançadas dos interferômetros LIGO (os aLIGO) detectaram um sinal forte de ondas gravitacionais vindo de uma região do céu próxima do polo sul da Terra. Foi uma surpresa, por dois aspectos: primeiro, porque os aLIGO iam entrar em operação de busca astrofísica (a chamada O1) somente a partir do dia 18 de setembro e, portanto, ninguém estava esperando uma detecção tão cedo (o fato é que eles já estavam com excelente sensibilidade); segundo, porque o sinal era muito forte ($h \sim 10^{-21}$) e com componentes em frequências (de 30Hz a 250Hz) exatamente na faixa de maior sensibilidade dos aLIGO. Parecia um sinal artificial introduzido no sistema de aquisição de dados, num processo conhecido por injeção de sinal, já utilizado algumas vezes para se verificar se os programas computacionais construídos eram capazes de detectar sinais de ondas gravitacionais nos dados. Entretanto, foi verificado que não ocorreram injeções artificiais e após um mês de análises, os membros das colaborações LIGO e Virgo tinham mais de 5! em significância estatística que estavam lidando com um sinal verdadeiro, que foi batizado de GW150914, em razão da data na qual foi detectado.

O sinal, com duração de aproximadamente 0,2 segundos, começou a ser detectado primeiro no interferômetro de Livingston (Louisiana) e cerca de 7 milisegundos mais tarde no de Hanford (estado de Washington). Após a análise completa, concluiu-se que se tratava do sinal das ondas gravitacionais emitidas nas últimas ~5 órbitas e coalescência de dois buracos negros estelares pertencentes a um sistema binário. As massas dos buracos negros eram de 36 e 29 massas solares. Após a coalescência restou um buraco negro de 62 massas solares com um spin igual a 0,65 (1 é o máximo). Cerca de 3 massas solares foram emitidas no pulso final de ondas gravitacionais. A energia libertada pelo pico do evento GW150914 foi mais do que seis vezes maior do que a luz combinada de todas as estrelas e galáxias no universo observável. A potência no pico da emissão foi de $3{,}6 \times 10^{56}$ erg/s. Este evento ocorreu a uma distância de 1,3 bilhões de anos-luz da Terra. Os buracos negros, antes do choque, chegaram a orbitar entre si com 60% da velocidade da luz! Imagine dois gigantes num "pega" a essa velocidade! Para os

aLIGO detectarem eles foram capazes de perceber uma variação na distância entre os espelhos de apenas $\sim 10^{-18}$ metros, o que é mil vezes menor que o diâmetro de um próton! Uma imagem dessas ondas pode ser vista na FIGURA 10.3.

Figura 10.3: Ondas gravitacionais de GW150914 https://www.youtube.com/watch?v=kkKDs59zcdI

Em 12 de outubro de 2015 foi detectado outro evento na corrida O1, mas a significância estatística era baixa (menor que 2!) e, portanto, não foi levado muito a sério. Porém, em 26 de dezembro chegou outro também com significância estatística em torno de 5! . No total foram detectadas, com alta significância estatística e até o final da corrida O2 (a qual se encerrou em 25 de agosto de 2017), as últimas órbitas e coalescência de cinco binárias de buracos negros (batizadas, respectivamente de GW150914, GW151226, GW170104, GW170608, GW170814), além de uma binária de estrelas de nêutrons. Esta última binária (GW170817), detectada no dia 17 de agosto de 2017, deu um show após a coalescência das estrelas de nêutrons.

Com o evento GW150914 foi inaugurada a Astronomia ou Astrofísica de Ondas Gravitacionais, uma nova janela para se observar o universo, mas com o evento

GW170817 foi inaugurada uma outra nova astronomia, a Astronomia Multimensageira com Ondas Gravitacionais que talvez, com mais probabilidade que a primeira, vá revolucionar o conhecimento que temos do universo.

Essas descobertas foram tão importantes que rederam o prêmio Nobel de Física de 2017. Os três agraciados: Rainer Weiss, Kip S. Thorne e Barry C. Barish, representam bem a colaboração que detectou estes eventos.

10.5 O QUE APRENDEMOS COM AS PRIMEIRAS ONDAS GRAVITACIONAIS OBSERVADAS?

Como mencionado na seção anterior, até a segunda corrida observacional O2, que se encerrou em 25 de agosto do 2017, foram detectados, com alta significância estatística, cinco eventos envolvendo pares de buracos negros e um evento envolvendo um par de estrelas de nêutrons. Na tabela 10.1, são resumidos os parâmetros principais obtidos para os pares de buracos negros detectados através da análise dos sinais *chirp* (gorjeio) da evolução das suas órbitas, seguidos da coalescência e *ring down* (ressoar) devido ao choque do par.

	GW150914	GW151226	GW170104	GW170608	GW170814
Razão S/R	23,7	13,0	13	13	15
Taxa de falso alarme	(~ 400 mil anos)$^{-1}$	(~ 400 mil anos)$^{-1}$	(70 mil anos)$^{-1}$	(160 mil anos)$^{-1}$	(140 mil anos)$^{-1}$
M primária	36,2 M⊙	14,2 M⊙	31,2 M⊙	12 M⊙	30,5 M⊙
M secundária	29,1 M⊙	7,5 M⊙	19,4 M⊙	7 M⊙	25,3 M⊙
Massa total	65,3 M⊙	21,8 M⊙	50,7 M⊙	19 M⊙	55,9 M⊙
Massa final	62,3 M⊙	20,8 M⊙	48,7 M⊙	18,0 M⊙	53,2 M⊙
Spin final	0,68	0,74	0,64	0,69	0,70
E irradiada	3,0 M⊙c^2	1,0 M⊙c^2	2,0 M⊙c^2	0,85 M⊙c^2	2,7 M⊙c^2
Pico de Luminosidade	3,6 x 10^{56} erg/s	3,3 x 10^{56} erg/s	3,1 x 10^{56} erg/s	3,4 x 10^{56} erg/s	3,7 x 10^{56} erg/s
Distância de luminosidade	420 Mpc (1,4 G a-l)	440 Mpc (1,4 G a-l)	880 Mpc (2,9 G a-l)	340 Mpc (1,1 G a-l)	540 Mpc (1,8 G a-l)
Redshift	0.09	0,09	0,18	0,07	0,11

Tab. 10.1–Parâmetros dos eventos envolvendo pares de buracos negros (a-l é anos-luz)

Diferentemente dos quatro primeiros, que foram detectados apenas pelos dois interferômetros aLIGO, o último, GW170814, também foi detectado pelo interferômetro Virgo. Por esta razão, a localização do último evento foi muito mais precisa que as dos anteriores. Se apenas usássemos as informações dos dois aLIGO, o evento GW170814 seria localizado em uma área de 1160 graus (com 90% de credibilidade). Adicionando

as informações do interferômetro Virgo, a área de localização fica reduzida para apenas 60 graus!

A detecção tripla de GW170814 também permitiu que fosse possível se testar a natureza das polarizações das ondas gravitacionais, permitindo assim uma nova classe de testes fenomenológicos da gravitação e da teoria da Relatividade Geral de Einstein. Foi encontrado que os dados favorecem fortemente as polarizações tensoriais puras de ondas gravitacionais, sobre as polarizações escalares ou vetoriais puras. Um resultado que vai no sentido da comprovação da relatividade geral, já que ela só prevê as componentes tensoriais (mais e cruzada).

Em média, as massas encontradas para os buracos negros detectados foi um pouco maior do que se esperava, com base no conhecimento que tínhamos dos sistemas binários emissores de raios-X. Isto fez com que a própria teoria de evolução estelar, para explicar como esses buracos negros com mais massa foram formados, fosse colocada em cheque. Por outro lado, também levantou a hipótese de que estes buracos negros mais massivos não teriam origem na evolução estelar, mas seriam produtos do universo primordial, ou seja, teriam origem no nascimento do universo, como defeitos topológicos do Big Bang. Nesta hipótese eles estariam contribuindo para uma parcela da massa da matéria escura no universo.

Essas detecções também serviram para se limitar a massa da partícula gráviton, que na teoria quântica seria o quantum do campo de ondas gravitacionais e, portanto, a sua partícula mediadora. A massa do gráviton, caso ele tenha massa (a teoria da relatividade geral postula que ele não tem, ou seja, que a massa dele é zero), não poderia ser maior que 10^{-58} kg!

Vários outros testes de teorias da gravitação (que incluem a relatividade geral), foram feitos com os resultados destes cinco eventos envolvendo binárias de buracos negros, porém eles estão fora do escopo desta apostila, em razão de serem de um nível mais técnico e avançado da física.

Distintamente de todos os cinco eventos descritos anteriormente, envolvendo pares de buracos negros, o sexto evento, observado em 17 de agosto de 2017 e, portanto, batizado de GW170817, emitiu muita radiação no espectro eletromagnético.

O evento GW170817 tratava-se das ondas gravitacionais observadas das últimas ~1500 órbitas e coalescência de um par de estrelas de nêutrons. A duração do evento registrado foi de aproximadamente 56 segundos! Batendo de longe o recorde anterior de GW151226, o mais longo dos eventos envolvendo buracos negros, que havia demorado ~1,7 segundos! Ele também foi o mais próximo, distante "apenas" 40 Mpc (130 M a-l). Os parâmetros deste evento são apresentados na tabela 10.2, supondo que as estrelas de nêutrons não tinham muita rotação.

Razão S/R	32,4
Taxa de falso alarme	(1,1 milhões anos)$^{-1}$
M primária	1,48 M⊙
M secundária	1,26 M⊙
Massa total	2,74 M⊙
Massa final	2,71 M⊙
E irradiada	> 0,025 M⊙c^2
Pico de Luminosidade	3,6 x 10^{56} erg/s
Distância de luminosidade	40 Mpc (130 M a-l)
Redshift	0,008

Tabela 10.2–Parâmetros do evento GW170817 (a-l é anos-luz).

Por ter sido detectado por três interferômetros, a localização do evento, com 90% de confiança, ficou restrita a uma área no céu menor que 55°. Isto ajudou muito todos os outros grupos de astrônomos que observam no espectro eletromagnético a localizarem em qual galáxia o evento ocorreu. E eles tinham muitas razões para fazerem isto. Cerca de 1,7 segundos depois do horário que os interferômetros laser haviam registrado que as estrelas de nêutrons haviam coalescido, os satélites *Fermi* (NASA) e *INTEGRAL* (ESA) detectaram um pulso de raios-gama. Ficava claro que se tratava de uma coalescência de estrelas de nêutrons e que elas realmente, como se suspeitava, eram a causa de *bursts* de raios-gama de curta duração. Foi um alarme geral para a comunidade de astrônomos que havia assinado acordos de busca multimensageira com a Colaboração Científica LIGO.

Esta comunidade, formada por cerca de 70 grupos, começou uma busca implacável por sinais eletromagnéticos nas bandas de rádio, infravermelho, óptico, ultravioleta, raios-X e por raios cósmicos e neutrinos. Tanto a busca, como os resultados da busca foram interessantíssimos e os resultados acabaram sendo publicados em um trabalho com mais de 3700 autores.

O primeiro sinal eletromagnético detectado depois das ondas gravitacionais e do pulso de raios-gama foi um sinal no óptico. Ele foi encontrado pelo grupo do telescópio Swope, quase 11 horas despois, na galáxia NGC4993, que justamente está localizada dentro da área no céu que os interferômetros laser disseram ter ocorrido o evento e dista 130 milhões de anos-luz da Terra, a mesma distância na qual eles haviam dito que o evento ocorrera. Vários outros grupos, observando no óptico, detectaram em seguida. Entre eles estão o da *Dark Energy Camera* e do *T80 South*, ambos com participação de brasileiros (e brasileiras). Em seguida, foi detectado sinal, ainda dentro das primeiras 24 horas da coalescência, no infravermelho e no ultravioleta. Sinais em raios-X e rádio só apareceram 9 e 16 dias depois, respectivamente, quando os sinais no ultravioleta e no óptico já tinham desaparecido e o em infravermelho estava por terminar. O sinal de raios-X durou apenas poucas horas. Porém, o de rádio foi o de mais longa duração. Ele durou meses, com um pico a 149 dias depois da coalescência.

A primeira conclusão de toda esta observação multimensageira, pelo fato do pulso de raios-gama ter chegado apenas 1,7 segundos depois da coalescência das duas estrelas de nêutrons, foi que a velocidade das ondas gravitacionais não pode diferir mais do que uma parte em 10^{15} da velocidade das ondas eletromagnéticas. Desta forma, uma série de teorias de gravitação que previam diferenças de velocidades maiores do que esta, tiveram que ser descartadas ou revisadas.

As ondas gravitacionais sozinhas forneceram elementos suficientes no caso de GW170817 para se tirar três conclusões (entre outras tantas): novamente, as polarizações das ondas gravitacionais são consistentes com a natureza tensorial e a massa do gráviton não poderia ser maior que 10^{-58} kg, resultados que estão em concordância com a teoria da Relatividade Geral, e pôde-se dizer algo sobre a equação de estado da matéria nuclear de estrelas de nêutrons.

Também foi concluído, agora a partir das curvas de luz no espectro eletromagnético, que o choque das duas estrelas de nêutrons desencadeou um evento chamado na literatura de *Quilonova*, o qual, no caso de GW170817, teria sido o responsável por produzir, pelo menos, ~0,05 massas solares (ou cerca de 17 mil Terras) de elementos pesados, com número atômico maior que o do ferro, incluindo ouro, platina e urânio, demonstrando que coalescências de estrelas de nêutrons desempenham um papel no processo r de nucleossíntese no Universo.

Finalmente, a observação de GW170817 permitiu o cálculo da constante de Hubble de forma independente dos métodos astronômicos clássicos. O resultado foi consistente com os valores obtidos anteriormente por observações no espectro eletromagnético. Precisões maiores são previstas em detecções futuras de ondas gravitacionais.

Infelizmente, não foi possível se determinar se as duas estrelas de nêutrons, após coalescerem, formaram uma estrela de nêutrons mais massiva (de 2,74 M⊙) ou um buraco negro. O sinal em ondas gravitacionais que indicaria qual teria sido o produto final, foi fraco demais para ser detectado pelos interferômetros laser aLIGO e Virgo. No futuro, estes detectores deverão estar operando com maior sensibilidade e/ou podemos ter sorte de observar coalescência mais próximas de estrelas de nêutrons.

10.6 E QUAL É O FUTURO DA ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS?

Detectores de ondas gravitacionais, desde os tempos de Weber, sempre estiveram em contínuo aperfeiçoamento. Não foi diferente com o LIGO e o Virgo. Neste processo de aperfeiçoamento estes dois últimos acabaram detectando ondas gravitacionais de fato: o LIGO, na sua versão aLIGO, pela primeira vez em 2015, e o Virgo em 2017. Eles vão continuar a serem aperfeiçoados, com o objetivo de observarem mais eventos, mais fracos e/ou mais distantes. A próxima versão do LIGO, que vai substituir o aLIGO, é o A+, que vai entrar em operação no final de 2018, juntamente com uma versão aperfeiçoada do Virgo avançado, na chamada terceira corrida observacional (O3). Nessa versão A+ do LIGO, será realizada *squeezing* da luz laser, uma técnica que melhora a precisão das medidas e, com isto, a sensibilidade do interferômetro. O A+ vai sofrer

alguns ajustes e ainda operar por mais duas corridas O4 e O5. Depois ele sofrerá modificações substanciais. Os espelhos de 40 kg de sílica (vidro) serão trocados por espelhos de 200 kg de silício, os quais serão resfriados e mantidos a temperatura de 123K, na qual o silício apresenta um ruído térmico muito reduzido por causa de uma variação anômala na sua expansão térmica nesta temperatura. Esta versão se chama *LIGO Voyager*, e o grupo de ondas gravitacionais do INPE (GWINPE) tem participação direta no desenvolvimento deste projeto, que deverá estar operacional em torno de 2027. Uma outra parte do GWINPE trabalha na identificação dos ruídos na análise de dados e vai estar trabalhando em todas essas corridas, inclusive nas do *LIGO Voyager*.

A sensibilidade da versão A+ na corrida O5 será cerca de 3 vezes melhor em amplitude que a versão que operou em O2. Isto significa que os interferômetros LIGO A+ vão conseguir observar a distâncias 3 vezes maiores, ou seja, volumes do universo 27 vezes maiores (o volume vai com o cubo do raio). A consequência disto é muito animadora. Ora, detectamos até agora cinco pares de buracos negros e um par de estrelas de nêutrons e O5 vai ser uma corrida mais longa que O1 e O2 juntas, portanto, espera-se mais de uma centena de observações para O5, e a versão *LIGO Voyager* deve observar centenas a cada ano, depois que todos os ajustes forem feitos nela.

Paralelamente à operação do *LIGO Voyager* será iniciada a construção de um outro interferômetro, em outro local dos EUA, o chamado *Cosmic Explorer*. Além de também ter os espelhos resfriados, para diminuir o ruído Browniano, ele terá braços de 40 km! A previsão é que ele vai ser capaz de observar centenas de milhares de eventos em alguns anos de operação. Mas para isto, ele não pode trabalhar sozinho. Um grande interferômetro também será construído na Europa, chamado de *Einstein Telescope* ou ET, com braços de 10 km, em forma triangular, também com espelhos resfriados e subterrâneo, como o KAGRA japonês.

Estes novos interferômetros *Cosmic Explorer* e ET estarão operando a partir da década de 2030, juntamente com o LISA. Outra coisa muito interessante é que binárias de buracos negros estelares e estrelas de nêutrons que o LISA detectar entrarão na faixa de detecção daqueles interferômetros de solo cerca de 10 anos depois, para coalescerem! Portanto, poderemos prever com dez anos de antecedência o momento e local exato dessas coalescências, permitindo que os astrônomos/astrofísicos multimensageiros planejem com bastante antecedência programas de observação. Vai haver até tempo

para submeterem projetos de observação nas agências de fomento à pesquisa! Paralelamente, as técnicas de *Pulsar Timing* e Modo B da radiação cósmica de fundo eletromagnética em micro-ondas já deverão ter frutos observacionais.

Desta forma, tudo indica que o futuro para a Astrofísica de Ondas Gravitacionais neste século XXI e nos subsequentes será brilhante.

Um aspecto muito interessante, é que a observação de ondas gravitacionais vai permitir que se descubra se o universo "nasceu" no Big Bang ou teve uma existência anterior ao momento que dizemos ter ocorrido o Big Bang (há 13,8 bilhões de anos atrás), isto porque, diferentemente das ondas eletromagnéticas, o universo sempre foi transparente para as ondas gravitacionais, mesmo durante a monstruosa densidade no momento do Big Bang. Desta forma, as ondas gravitacionais poderão nos dizer exatamente o que ocorreu com o universo. Esta informação vai estar registrada no espectro da radiação de fundo cosmológica em ondas gravitacionais. Se houve um Bing Bang o espectro vai ter uma "cara". Se, por outro lado, houve uma fase do universo anterior, este se contraiu, mas não chegou a se reduzir a um ponto, mas sim a um volume finito não nulo, o espectro de fundo vai ter outra "cara", diferente da primeira. Sabemos identificar, a partir da "cara" dos espectros de fundo, o que aconteceu com o universo, portanto, seremos capazes de descobrir como o universo nasceu, basta que consigamos medir este espectro de fundo cosmológico em ondas gravitacionais.

Além de nos dizer como o universo teve início, a astronomia de ondas gravitacionais vai revolucionar o nosso conhecimento da física e astrofísica e, provavelmente, nos ajudar a responder às suas principais questões da atualidade, tais como a matéria escura e a energia escura.

Provavelmente uma nova física vai ser reescrita com informações obtidas através das observações multimensageiras envolvendo ondas gravitacionais. Certamente engenheiros no futuro vão, a partir desta nova física, desenvolver novas tecnologias, que revolucionarão a maneira como vivemos o dia-a-dia.

10.7 BIBLIOGRAFIA

ABBOTT, B.'P. ABBOTT, R. ABBOTT, T.'D. ABERNATHY, M.'R. ACERNESE, F. ACKLEY, K. ADAMS, C. ADAMS, T. ADDESSO, P. ADHIKARI, R.'X. ADYA, V.'B. AFFELDT, C. AGATHOS, M. AGATSUMA, K. AGGARWAL, N. AGUIAR, O.'D. AIELLO, L. AIN, A. AJITH, P. ALLEN, B. ALLOCCA, A. ALTIN, P.'A. ANDERSON, S.'B. ANDERSON, W.'G. ARAI, K., et al. ; Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. Physical Review Letters (Print), v. 116, p. 061102-1-061102-16, 2016.

ABBOTT, B.'P. ABBOTT, R. ABBOTT, T.'D. ABERNATHY, M.'R. ACERNESE, F. ACKLEY, K. ADAMS, C. ADAMS, T. ADDESSO, P. ADHIKARI, R.'X. ADYA, V.'B. AFFELDT, C. AGATHOS, M. AGATSUMA, K. AGGARWAL, N. AGUIAR, O.'D. AIELLO, L. AIN, A. AJITH, P. ALLEN, B. ALLOCCA, A. ALTIN, P.'A. ANDERSON, S.'B. ANDERSON, W.'G. ARAI, K. , et al. ; GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence. Physical Review Letters (Print), v. 116, p. 241103, 2016.

ABBOTT, B.'P. ABBOTT, R. ABBOTT, T.'D. ABERNATHY, M.'R. ACERNESE, F. ACKLEY, K. ADAMS, C. ADAMS, T. ADDESSO, P. ADHIKARI, R.'X. ADYA, V.'B. AFFELDT, C. AGATHOS, M. AGATSUMA, K. AGGARWAL, N. AGUIAR, O.'D. AIELLO, L. AIN, A. AJITH, P. ALLEN, B. ALLOCCA, A. ALTIN, P.'A. ANDERSON, S.'B. ANDERSON, W.'G. ARAI, K. , et al. ; Binary Black Hole Mergers in the First Advanced LIGO Observing Run. Physical Review X, v. 6, p. 041015-1-041015-36, 2016.

ABBOTT, B.'P. ABBOTT, R. ABBOTT, T.'D. ACERNESE, F. ACKLEY, K. ADAMS, C. ADAMS, T. ADDESSO, P. ADHIKARI, R.'X. ADYA, V.'B. AFFELDT, C. AFROUGH, M. AGARWAL, B. AGATHOS, M. AGATSUMA, K. AGGARWAL, N . **AGUIAR, O.'D.** AIELLO, L. AIN, A. AJITH, P. ALLEN, B. ALLEN, G.

ALLOCCA, A. ALTIN, P.'A. AMATO, A. , et al. ; GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2. PHYSICAL REVIEW LETTERS JCR, v. 118, p. 221101-1-221101-17, 2017.

ABBOTT, B. P. ABBOTT, R. ABBOTT, T. D. ACERNESE, F. ACKLEY, K. ADAMS, C. ADAMS, T. ADDESSO, P. ADHIKARI, R. X. ADYA, V. B. AFFELDT, C. AFROUGH, M. AGARWAL, B. AGATHOS, M. AGATSUMA, K. AGGARWAL, N. Aguiar, O. D. AIELLO, L. AIN, A. AJITH, P. ALLEN, B. ALLEN, G. ALLOCCA, A. ALTIN, P. A. AMATO, A. , et al. ; GW170608: Observation of a 19 Solar-mass Binary Black Hole Coalescence. The Astrophysical Journal, v. 851, p. L35, 2017.

ABBOTT, B.'P. ABBOTT, R. ABBOTT, T.'D. ACERNESE, F. ACKLEY, K. ADAMS, C. ADAMS, T. ADDESSO, P. ADHIKARI, R.'X. ADYA, V.'B. AFFELDT, C. AFROUGH, M. AGARWAL, B. AGATHOS, M. AGATSUMA, K. AGGARWAL, N . **AGUIAR, O.'D.** AIELLO, L. AIN, A. AJITH, P. ALLEN, B. ALLEN, G. ALLOCCA, A. ALTIN, P.'A. AMATO, A. , et al. ; GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence. PHYSICAL REVIEW LETTERS JCR, v. 119, p. 141101, 2017.

ABBOTT, B.'P. ABBOTT, R. ABBOTT, T.'D. ACERNESE, F. ACKLEY, K. ADAMS, C. ADAMS, T. ADDESSO, P. ADHIKARI, R.'X. ADYA, V.'B. AFFELDT, C. AFROUGH, M. AGARWAL, B. AGATHOS, M. AGATSUMA, K. AGGARWAL, N . **AGUIAR, O.'D.** AIELLO, L. AIN, A. AJITH, P. ALLEN, B. ALLEN, G. ALLOCCA, A. ALTIN, P.'A. AMATO, A. , et al.; GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. PHYSICAL REVIEW LETTERS JCR, v. 119, p. 161101, 2017.

Aguiar, Odylio Denys. Past, present and future of the Resonant-Mass gravitational wave detectors. Research in Astronomy and Astrophysics, v. 11, p. 1-42, 2011.

Aguiar, O D; BARROSO, Joaquim José Carvalho N C CASTRO, Pedro José de Cedeño M, C E Da Silva Costa, C F de Araujo, J C N Evangelista, E F D Furtado, Sergio R Miranda, O D Moraes, P H R S Pereira, E S Silveira, P R Stellati, C OLIVEIRA JR, Nei Fernandes de Gratens, Xavier de Paula, L A N de Souza, Sérgio T Marinho Jr, R.M. Oliveira, F G Frajuca, C Bortoli, F S Pires, R Bessada, D F A Magalhães, Nadja S. , et al. ; Status Report of the Schenberg Gravitational Wave Antenna. Journal of Physics. Conference Series (Print), v. 363, p. 012003, 2012.

LIGO, http://www.ligo.org/ e http://www.ligo.caltech.edu/

VIRGO, http://www.virgo-gw.eu

GEO600, http://www.geo600.org/

KAGRA http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

LIGO-Índia http://gw-indigo.org/tiki-index.php?page=LIGO-India

LISA, http://sci.esa.int/lisa/ and http://lisa.nasa.gov/

DECIGO http://sites.google.com/site/amaldi8projectwednesday624/abstracts

Big Bang Observer (BBO), http://en.wikipedia.org/wiki/Big_Bang_Observer

NANOGrav, http://www.nanograv.org/

Parkes Pulsar Timing Array (PPTA), http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/ppta

European Pulsar Timing Array (EPTA), http://www.epta.eu.org

Square Kilometre Array (SKA), http://www.skatelescope.org/

EINSTEIN Telescope, http://www.et-gw.eu/

Mario SCHENBERG, http://www.das.inpe.br/graviton/index.html

and http://www.das.inpe.br/video/

MINIGRAIL, http://www.minigrail.nl/

HFGW http://www.sr.bham.ac.uk/gravity/project.php?project=MHzDetector)

Habitabilidade Cósmica e a Possibilidade de Existência de Vida em Outros Locais do Universo

Frederico Vieira,
Dinelsa Machaieie,
Karin Fornazier,
Lia Corazza,
Manoel Castro,
José William Vilas-Bôas,
José Roberto Cecatto,
Carlos Alexandre Wuensche

INPE – Divisão de Astrofísica
Versão 2018

Adaptação do artigo publicado na Revista Brasileira de Ensino de Física, vo. 40, iss. 4 (2018) para o formato da apostila.

LISTA DE FIGURAS 3

11.1. INTRODUÇÃO 4

11.2. CONDIÇÕES COSMOLÓGICAS E ASTROFÍSICAS PARA O SURGIMENTO DE SISTEMAS VIVOS 6

11.3. A EVOLUÇÃO QUÍMICA DO UNIVERSO 8

11.3.1. CARACTERÍSTICAS DO MEIO INTERESTELAR 9

11.3.2. FORMAÇÃO DE COMPOSTOS SIMPLES 9

11.3.3. MOLÉCULAS NO MEIO INTERESTELAR E DISCOS PROTOPLANETÁRIOS 11

11.4. ZONA HABITÁVEL E HABITABILIDADE 14

11.4.1. HABITABILIDADE 15

11.5. CONSIDERAÇÕES SOBRE A VIDA 17

11.5.1. DOS ÁTOMOS AOS SISTEMAS VIVOS 18

11.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS 20

11.7. AGRADECIMENTOS 22

11.8. REFERÊNCIAS 23

LISTA DE FIGURAS

Figura 11.1 - Tabela periódica demonstrando abundâncias de elementos químicos em porcentagem de peso corporal de organismos vivos terrestres, bem como os elementos indispensáveis ao crescimento e sobrevivência do organismo, chamados de elementos essenciais. (Adaptado de Chopra (2009)) 8

Figura 11.2 - Representação esquemática das principais reações químicas que ocorrem nas nuvens interestelares. O símbolo PAH corresponde a Hidrocarbonetos Poli Aromaticos (Adaptado de Fraser (2002)) 10

Figura 11.3 – Esquema dos estágios primordiais de formação um sistema protoplanetário (Adaptado de Henning & Semenov (2013), Caselli & Ciccarelli (2012)). 12

Figura 11.4 – Fração de abundância do aminoácido glicina e de várias outras espécies similares ou parentes em função do tempo. A linha sólida indica espécies na fase gasosa e as linhas pontilhadas da mesma cor indicam mantos de gelo da mesma espécie. (Adaptado de Garrod (2013b)) 13

12.1. INTRODUÇÃO

A existência de vida no Universo tem permeado o pensamento humano desde os primórdios da civilização. Os avanços científicos do século XX, particularmente a partir da década de 1950, com a exploração do espaço exterior, permitiram um estudo mais aprofundado sobre uma série de fenômenos astronômicos que ampliaram, em muito, a compreensão do Universo. O cenário construído a partir dessas observações, em paralelo com avanços teóricos e modelos computacionais, indica que vivemos num Universo com cerca de 14 bilhões de anos, cuja composição inclui ~96% de matéria e energia escuras, de origem ainda desconhecida, e ~4% de matéria ordinária (basicamente constituída de prótons, nêutrons e elétrons) que deu origem às estrelas e galáxias, observadas principalmente através da emissão de radiação eletromagnética. Uma cronologia da evolução do modelo padrão, bem como uma descrição atualizada e didática do "status" da cosmologia atual pode ser encontrada em (Smoot *et al.* (1992), Bennett *et al.* (1994), Bennett *et al.* (2003), Bennett *et al.* (2013), Ade *et al.* (2014), Ade Ade *et al.* (2016), Patrignani *et al.* (2016)).

Esse cenário descreve o "Modelo Cosmológico Padrão" (doravante MCP), também conhecido como "Big Bang". O MCP prevê que a formação das primeiras estrelas ocorreu quando o Universo tinha de 100 a 200 milhões de anos. Estudos recentes sugerem, inclusive, que as condições para formação das primeiras populações de estrelas começaram antes dos primeiros 100 milhões de anos do Universo (Loeb (2014), Loeb (2016), Naoz *et al.* (2006)), quando o Universo primordial era composto, essencialmente, de Hidrogênio atômico (*H*) e Hélio (*He*). Elementos químicos mais pesados foram produzidos durante o ciclo de reações nucleares das primeiras gerações de estrelas, com massas de dezenas a centenas de vezes a massa do Sol.

A perda de massa por ventos estelares e explosões de supernovas (Nomoto *et al.* (2013), Maio *et al.* (2015), Kulkarni *et al.* (2014)) foram os principais responsáveis pelo enriquecimento do meio interestelar e fizeram com que as gerações de estrelas formadas posteriormente fossem produzidas em ambientes cuja composição química foi gradualmente enriquecida por elementos mais pesados do que o *He*. A consequência natural deste processo foi a síntese de moléculas cada vez mais complexas, em nuvens de gás e poeira cósmica (doravante "nuvens GP"), através de processos químicos na fase gasosa ou reações na superfície dos grãos de poeira (Tielens (2005), Herbst & Van Dishoek (2009), Garrod (2013).

As nuvens GP são regiões adequadas para a observação de moléculas de interesse bioquímico contendo, entre outras, moléculas de metanol (*CH3OH*), formaldeído (*H2CO*) e ácido fórmico (*HCOOH*) (Caselli & Ceccarelli (2012), Ehrenfreund & Chanrley (2000), Van Dishoeck & Blake (1998)). Estas nuvens são também "berçários

estelares". Seu interior frio favorece o colapso gravitacional de regiões que se fragmentam e podem formar estrelas. No caso de estrelas com massas menores que ~ 1 - 1,5 M_{Sol}[1], o colapso gravitacional dá origem a discos proto-planetários e a todos os objetos que compõem este sistema. O cenário acima permite descrever a formação do Sistema Solar, explicando a origem dos planetas rochosos e das condições físico-químicas necessárias para o surgimento da "vida como a conhecemos" (ver, e.g., Taylor (2005), Youdin *et al.* (2013), Williams & Cieza (2011)).

A transição de sistemas não vivos para sistemas vivos é, desde sempre, uma das maiores questões não respondidas da Ciência. Não existe ainda uma definição de vida que não apresente alguma falha, embora exista uma concordância sobre diversas características comuns aos sistemas vivos conhecidos, tais como ausência de equilíbrio termodinâmico; a presença de metabolismo; complexidade e organização; a existência de mecanismos de reprodução; capacidade de desenvolvimento; evolução e autonomia.

A evolução de sistemas químicos complexos é baseada nas propriedades de átomos e moléculas, bem como nas leis da termodinâmica (e.g., Olomucki (1993)). Ao estudar a origem da vida, porém, é necessário lidar com o paradoxo decorrente do fato de sistemas vivos serem compostos de estruturas químicas, inanimadas, extremamente organizadas. Uma forma coerente de tentar explicar o surgimento dos sistemas vivos é, partindo do "Big Bang", analisar a dinâmica e a evolução química do Universo com base no ciclo de formação e evolução estelar, que inclui o conhecimento das reações nucleares que produzem elementos mais pesados do que o *He*. O passo seguinte é explorar a relação entre essa evolução e a química que possibilitou a formação de sistemas planetários e organismos vivos. Essa abordagem é uma das linhas de ação da Astrobiologia, disciplina que estuda a origem, evolução, distribuição e destino da vida no Universo (Cottin *et al.* (2015), Santos *et al.* (2016), Horneck *et al.* (2016)).

O objetivo deste artigo é apresentar o cenário mais aceito da evolução química do Universo e sua relação com a origem dos sistemas vivos como os conhecemos, sob a ótica da Astrobiologia. Um segundo objetivo é sugerir um roteiro que possa ser usado em sala de aula, a partir do ensino médio, para a introdução da disciplina de astrobiologia no ensino de ciências com uma abordagem transdisciplinar.

Como sugestão para professores, além dos artigos de revisão citados ao longo do texto, artigos em português (Damineli (2010), Quillfeldt (2010), Paulino-Lima & Lage (2010), Pacheco (2014)) e textos completos (Zubay (2000), Lunine (2004), Shaw (2006), Horneck (2007), Cockell (2015), Longstaff (2015), Galante (2016)) podem ser utilizados como material básico para um abordagem formal ao tema.

[1] M_{Sol} equivale à massa do Sol, cerca de 2×10^{30} kg.

Este artigo está dividido em 6 seções. Após esta introdução, a seção 2 apresenta o modelo cosmológico padrão e o processo de formação das primeiras estruturas, levando à geração inaugural de estrelas. O papel do meio interestelar e das nuvens cósmicas de gás e poeira na formação de moléculas complexas e sistemas protoplanetários é discutido na seção 3. A seção 4 trata das chamadas zonas habitáveis e discute o conceito de habitabilidade. O conceito de vida e a evolução química necessária ao surgimento da mesma são abordados na seção 5 enquanto as considerações finais são apresentadas na seção 6.

12.2. CONDIÇÕES COSMOLÓGICAS E ASTROFÍSICAS PARA O SURGIMENTO DE SISTEMAS VIVOS

O modelo cosmológico que melhor descreve o Universo em grande escala é conhecido como o "Modelo Cosmológico Padrão", também conhecido como modelo ΛCDM (ver, e.g., Ade *et al.* (2014), Ade *et al.* (2016), Calabrese *et al.* (2017)). Ele pode ser descrito pelos parâmetros cosmológicos primários: as densidades de matéria escura fria $\mathbf{\Omega_{CDM}}$ e de matéria bariônica $\mathbf{\Omega_b}$; a densidade de energia escura $\mathbf{\Omega_\Lambda}$; a constante de Hubble $\mathbf{H_0}$; a amplitude das flutuações de matéria, responsável pela formação das estruturas cósmicas $\boldsymbol{\sigma_8}$ e a profundidade óptica $\boldsymbol{\tau}$ na época da formação dos átomos de *H* e *He* neutros. Uma descrição atualizada dos parâmetros cosmológicos pode ser encontrada, por exemplo, em Patrigniani *et al.* (2016) e Calabrese *et al.* (2017)).

As medidas desses parâmetros vêm sendo feitas desde a década de 1990 e foram bastante refinadas com os resultados das observações dos satélites WMAP (Bennett *et al.* (2013), Planck (Ade *et al.* (2014), Ade *et al.* (2016)) e dos experimentos Atacama Cosmology Telescope – ACT (Dunkley *et al.* (2013), Hlozek *et al.* (2012), Sievers *et al.* (2013), Lindner *et al.* (2015)) e South Pole Telescope – SPT (Reichardt *et al.* (2012), Shirokoff *et al.* (2011), Story *et al.* (2013)). Elas são complementadas pelas observações das estruturas em grande escala no Universo, constituídas por aglomerados e super aglomerados de galáxias, cujas referências bibliográficas recomendadas podem ser encontradas nos sites dos levantamentos "Sloan Digital Sky Survey" (SDSS 2017), "APM Survey" (Maddox *et al.* (1990)), "2dF Survey" (2dF 2017) e "6dF Survey" (6dF 2017).

O quadro geral que emerge do modelo ΛCDM é de um Universo com cerca de 14 bilhões de anos, constituído de ~ 69% de energia escura, ~ 27% de matéria escura e ~ 4% de matéria bariônica, em expansão acelerada. Sua evolução é adequadamente descrita pela Teoria Geral da Relatividade e governada pela contribuição das componentes do tensor matéria-energia, que interagem através da força gravitacional.

As grandes estruturas hoje observadas foram formadas hierarquicamente, com estrelas interagindo gravitacionalmente para formar aglomerados estelares, em seguida galáxias e posteriormente, aglomerados de galáxias e estruturas ainda maiores.

De acordo com o modelo ΛCDM, estima-se que de poucos segundos à 20 min (~ 1000 s) após o Big Bang, a partir dos prótons e nêutrons livres, ocorreu a formação de ^3He, ^4He e uma fração de Deutério (*D*) e Lítio (*Li*), da ordem de ~ 10^{-5} e ~10^{-9} da abundância *nucleossíntese primordial* e, devido à rápida expansão e resfriamento do Universo, não foi possível produzir nenhum outro elemento mais pesado durante essa fase.

As primeiras estruturas gravitacionalmente ligadas no Universo, constituídas inicialmente de grandes nuvens de gás *H* e *He*, condensaram-se a partir do gás primordial, alguns milhões de anos após a recombinação. A formação das chamadas estrelas de População III (Pop III), com massas muito altas (até ~ 200 – 500 M_{Sol} e vida extremamente curta (< 100.000 anos) na Sequência Principal) ocorreu cerca de 100 - 200 milhões de anos após o Big Bang iniciando a produção dos elementos mais pesados que a série *Li, Be, B*, chamados genericamente, no jargão astrofísico, de "metais".

Assim, em poucas centenas de milhões de anos as explosões de gerações sucessivas de estrelas dispersaram elementos químicos mais pesados que *Li, Be, B*, enriquecendo quimicamente o meio interestelar e, consequentemente, as novas gerações de estrelas (Tielens (2013)). Alguns autores (Naoz *et al.* (2006), Loeb & Furlanetto (2013), Loeb (2014), Loeb (2016) têm uma abordagem mais radical, sugerindo, a partir de estudos teórico-computacionais, que as condições que desencadearam a formação das primeiras estrelas surgiram quando o Universo tinha cerca de 30 milhões de anos. Isso significa que as condições para produção de elementos de importância prebiótica poderia ser antecipada em, pelo menos, 70 milhões de anos.

O ciclo evolutivo das estrelas é diretamente dependente de sua massa, sendo que estrelas com massa $M < 1{,}4\ M_{Sol}$ vivem da ordem de alguns bilhões a alguns trilhões de anos. O intervalo de massas das chamadas estrelas de baixa massa vai de 0,08 M_{Sol}, que é o limite de massa que permite o início do ciclo de reações de fusão de *H*, até cerca de ~ 2 M_{Sol}. Os objetos com massas menores que 0,08 M_{Sol} são conhecidos como *anãs marrons*. As estrelas de massa intermediária ($2 < M/M_{Sol} < 8$) produzem núcleos degenerados de *C*, não sendo capazes de processa-lo para formar elementos mais pesados. Somente *estrelas massivas*, com massas maiores que ~ 8 M_{Sol}, produzem os elementos químicos mais pesados que o Carbono (*C*), sendo os principais *C*, Nitrogênio (*N*), Oxigênio (*O*), Fósforo (*P*) e Enxofre (*S*). Ao final do ciclo de reações nucleares, elas explodem como supernovas e, neste processo, produzem desde o Ferro (*Fe*), último elemento do ciclo de fusão nuclear, até o Urânio (*U*), o último elemento da tabela periódica produzido de forma natural.

A química e o metabolismo da vida, como a conhecemos, são compostos, principalmente, pelos elementos químicos *C, N, O, P* e *S*, conhecidos sob a sigla de **CHONPS**. Obviamente há outros elementos importantes para o metabolismo dos seres vivos, porém os **CHONPS** estão presentes em praticamente todas as formas de vida conhecidas, tornando-os um denominador comum. A proporção desses elementos, tanto no Sol quanto em sistemas vivos é mostrada na figura 11.1. Os elementos **CHON** circundados por círculos vermelhos, correspondem a cerca de 96% do peso corporal de um ser vivo e aproximadamente 72% da massa do Sol.

Figura 11. 1 - Tabela periódica demonstrando abundâncias de elementos químicos em porcentagem de peso corporal de organismos vivos terrestres, bem como os elementos indispensáveis ao crescimento e sobrevivência do organismo, chamados de elementos essenciais. (Adaptado de Chopra (2009)).

Essencialmente, todos os elementos químicos do *C* ao *Fe* foram produzidos por fusão nuclear ou outros processos no interior de estrelas em algum momento da evolução do Universo. Sem metais, teríamos apenas moléculas formadas por *H* e *He*, estáveis somente em condições de baixíssima temperatura, como por exemplo HeH^+ e, muito provavelmente, não haveria formação de planetas ou de vida como a conhecemos (ver, e.g., Wilson, no Handbook of Molecular Physics (2003)).

12.3. A EVOLUÇÃO QUÍMICA DO UNIVERSO

O processo de formação de moléculas no espaço é afetado por vários fatores, tais como as condições fisico-químicas do ambiente, o estado dos "reagentes" e as fontes de

energia envolvidas. Conhecer as características e propriedades do chamado Meio Interestelar (MI) é essencial para uma melhor compreensão dos processos de evolução e enriquecimento químico em ambientes astrofísicos.

12.3.1. CARACTERÍSTICAS DO MEIO INTERESTELAR

O MI corresponde a todo material existente entre as estrelas. É constituído de gás, poeira, campo de radiação (radiação eletromagnética de estrelas, galáxias e outros corpos celestes bem como fótons da Radiação Cósmica de Fundo em Microondas), raios cósmicos (constituídos de partículas elementares e núcleos atômicos) e campo magnético. O gás é a componente dominante, misturado com a poeira (100 para 1 em massa) e pode ser encontrado no estado neutro (na forma de átomos ou moléculas) e/ou ionizado.

As condições físico-químicas do MI, também chamadas fases, são bastante heterogêneas, com a temperatura e densidade do gás variando de ~ 10 a ~10^6 K e de ~10^{-4} a mais de 10^8 cm^{-3}, respectivamente. Regiões de gás e poeira com temperaturas ~10 K e densidades maiores que 10^3 cm^{-3}, comumente chamadas de nuvens moleculares, são ambientes apropriados para a formação de moléculas e poeira com mantos de gelos (ver, e.g., Caselli & Ciccarelli (2012)). Um resumo das características das diferentes fases do MI encontra-se na Tabela 11.1 e uma descrição bastante detalhada de suas propriedades e processos físicos foi feita por A. Tielens (2005).

Tabela 11.1 –Síntese das propriedades das fases do MI

Fase	Dimensões típicas (pc)	n_0[b] (cm^{-3})	T[c] (K)	Estado do gás (H)
Nuvens moleculares	80	> 200	10	molecular
Meio frio neutro	100 – 300	50	80	neutro (atômico)
Meio morno neutro (atômico)	300 – 400	0,5	8000	neutro (atômico)
Meio morno ionizado	1000	0,1	8000	ionizado
Regiões HII	70	10^2 – 10^4	10^4	ionizado

[a] - 1 pc = 3,086 x 10^{18} cm.
[b] - Densidade típica do gás para cada fase.
[c] - Temperatura típica do gás para cada fase.

12.3.2. FORMAÇÃO DE COMPOSTOS SIMPLES

O reprocessamento de elementos químicos em nuvens moleculares (NM), durante os inúmeros ciclos de evolução estelar, é um requisito essencial para a formação de moléculas prebióticas, que são os principais constituintes dos organismos vivos. A síntese de moléculas nas NM's ocorre por reações químicas na fase gasosa ou nos

manto que se acumulam sobre a superfície dos grãos de poeira cósmica[2]. Embora os grãos de poeira constituam apenas 1% da massa do MI, eles são bastante importantes porque propiciam a associação dos átomos de H, na sua superfície, para formar o H_2, que é o principal constituinte das NM's. Além disso, a poeira juntamente com o H_2 bloqueiam a radiação ultravioleta e visível, protegendo dessa forma, as moléculas das regiões mais internas das nuvens de serem dissociadas (ver, e.g., Hollenbach (1971), Caselli & Ciccarlli (2012)). Também favorecem a hidrogenação de algumas moléculas e a ocorrência de reações químicas que levam à formação de substâncias cada vez mais complexas, como os aminoácidos, importantes para o desenvolvimento da vida. Um conjunto representativo das reações que ocorrem no MI é apresentado na figura 11.2.

Figura 11. 2 - Representação esquemática das principais reações químicas que ocorrem nas nuvens interestelares. O simbolo PAH corresponde a Hidrocarbonetos Poli Aromaticos (Adaptado de Fraser (2002)).

[2] Os grãos de poeira são partículas com tamanhos da ordem de 0.1 microns, compostas por silicatos e carbonatos (moléculas formadas por Silício e Carbono ligadas ao Oxigênio).

Moléculas contendo *C* são importantes nessa discussão uma vez que o carbono é essencial para a existência da vida, e o elemento estruturante da química orgânica. Essa importância decorre das seguintes propriedades do *C*: ele é o quarto elemento mais abundante no Universo; é extremamente versátil quimicamente (comparado, p.ex., com o Silício, *Si*; possui a capacidade de realizar ligações covalentes com elementos com valência um, dois, três ou quatro; não é dissolvido ou reage com ácidos ou água; é capaz de formar cadeias muito longas (nenhum outro elemento é capaz de formar tantas ligações tão fortes), além de permitir uma grande variedade de combinações de cadeias carbônicas, o que o torna o componente primário das macromoléculas.

12.3.3. MOLÉCULAS NO MEIO INTERESTELAR E DISCOS PROTOPLANETÁRIOS

A primeira linha espectral de uma substância química observada no MI data de 1904 (Pagni (2007)) com a detecção no visível do ion de Ca^+ no sistema f-Orionis. As primeiras observações das moléculas *CN, CH* e CH^+ foram feitas por volta de 1940 e, em 1951, foi detectado *H* neutro através de uma linha de comprimento de onda de 21 cm (Ewen & Purcell (1951), Hulst (1951)), no espectro de rádio. Na década de 60 foram observadas no MI linhas espectrais das moléculas de água e amônia (Cheung *et al.* (1968), Cheung *et al.* (1969)). No entanto, foi a observação, no MI, de uma linha espectral em 115 GHz da molécula de *CO* (Wilson *et al.* (1970)) que impulsionou o estudo sobre a possibilidade de formação de moléculas orgânicas nesse meio . Desde então, as observações têm mostrado a presença de quase todos os tipos de representantes das famílias da química orgânica: hidrocarbonetos, alcoois, ácidos, aldeídos, acetaldeídos, cetonas, aminas, éteres e açúcares (Pagni (2007), Kowk (2009), Kwok (2011), Herbst & van Dishoek (2009)). Uma cronologia das observações de moléculas no MI pode ser encontrada em http://www.astrochymist.org/astrochymist_ism.htm.

Até recentemente, quase 200 moléculas foram observadas no MI ou em envoltórios circunstelares, sendo boa parte delas orgânica (contém pelo menos um -*CH*). A maior parte delas foi detectada em nuvens moleculares, onde a presença de gás denso e grãos de poeira impede a penetração da radiação UV que tende a dissociá-las (Caselli & Ciccarelli (2012)). Uma lista das moléculas já observadas no espaço, com as respectivas referências, pode ser encontrada no site https://www.astro.uni-koeln.de/cdms/molecules.

O colapso de regiões em uma nuvem molecular leva, frequentemente, à formação de glóbulos e discos, dando posteriormente origem a sistemas protoestelares. Estes sistemas, constituídos de disco protoplanetário e protoestrela contém, além da composição química original, novas moléculas formadas durante o colapso. Excelentes discussões sobre a evolução química das nuvens interestelares e sua contribuição para a

formação de discos protoplanetários podem ser encontradas nos artigos de van Dishoek (2004) e Henning & Semenov (2013).

Os estágios primordiais de formação de um sistema protoplanetário são representados na figura 11.3, com o lado direito contendo as indicações da distribuição de temperatura dentro do disco, locais de formação de moléculas complexas, bem como as regiões onde se encontram íons e radicais, em função da distância à protoestrela central. No lado esquerdo são indicadas as regiões de formação dos planetas gigantes, a região de transporte turbulento de matéria para o centro do disco e a região de deposição das partículas de poeira e mantos de gelos. A linha azul, denominada linha de gelo, corresponde à posição em que as moléculas de água e amônia formam gelos na superfície dos grãos de poeira cósmica.

Figura 11. 3 – Esquema dos estágios primordiais de formação um sistema protoplanetário (Adaptado de Henning & Semenov (2013), Caselli & Ciccarelli (2012)).

A análise do gás e poeira ejetados de cometas mostram que 30% dos grãos de poeira contidos nesses corpos celestes são dominados pelos elementos $CHONPS$. Muitas espécies químicas de importância prebiótica foram detectadas em cometas. Como exemplo, no cometa $Hyakutake$, foram observadas amônia (NH_3), metano (CH_4), acetileno (C_2H_2), acetonitrila (CH_3CN) e isocianeto de hidrogênio (HNC). No cometa $Hale - Bopp$ também se observou CH_4, C_2H_2, ácido fórmico ($HCOOH$), HCN, HNC, ácido ciânico ($HNCO$), cianoacetileno (HC_3N) e tioformaldeído (H_2CS) (Ehrenfreund & Chanrley (2000)).

A presença dessas moléculas em cometas formados no disco protoplanetário sugere que estes podem ter sido uma importante fonte de moléculas orgânicas, incluindo aminoácidos, para a Terra primitiva (Brack (2007)). Reações químicas na superfície de grãos de poeira cósmica e suas interações com a fase gasosa têm sido estudadas através de simulações numéricas considerando centenas de reações químicas. Uma descrição

detalhada do processo de simulação das reações pode ser encontrada em Aikawa *et al.* (2005), Garrod (2013). Os resultados de Garrod mostram que mantos de gelo na superfície dos grãos, sob a ação de raios cósmicos, podem ser um ambiente propício para a formação de moléculas de importância prebiótica.

A figura 11.4 mostra a evolução temporal da fração de abundância de espécies químicas selecionadas, produzidas em um modelo de nuvem interestelar em colapso, para formar um sistema protoplanetário, constituído de estrela central e disco protoplanetário. Nesse modelo, por conta do colapso, a temperatura da nuvem varia gradativamente de 20 K a 400 K, numa escala de tempo de um milhão de anos. Os gelos mais abundantes nesse ambiente são formados de água (H_2O), seguido de monóxido de carbono (CO), amônia (NH_3) e metano (CH_4). Somente a partir de 100 K é que a abundância dessas espécies no estado gasoso é maior do que no estado sólido.

Figura 11. 4 – Fração de abundância do aminoácido glicina e de várias outras espécies similares ou parentes em função do tempo. A linha sólida indica espécies na fase gasosa e as linhas pontilhadas da mesma cor indicam mantos de gelo da mesma espécie. (Adaptado de Garrod (2013b)).

Há evidências que a glicina, um dos vinte aminoácidos ligados à vida, é produzido na superfície dos grãos sob a forma de gelo quando a temperatura do meio é de 30 a 200 K (ver, e.g., Garrod (2013b))

Acima dessa temperatura ela passa ao estado gasoso. Várias outras moléculas de importância prebiótica são produzidas nas nuvens de gás e poeira cósmica da mesma maneira e, de acordo com esses resultados, espera-se que as reações na superfície dos grãos definam a abundância de glicina nas nuvens cósmicas.

A dinâmica peculiar a cada sistema e a ocorrência de processos aleatórios devem ter sido responsáveis pelas diferenças entre os sistemas planetários distintos. Acredita-se que a evolução desse sistema dinâmico caótico levou à formação da primeira forma de vida na Terra e foi capaz de mantê-la durante bilhões de anos e possibilitar sua evolução.

12.4. ZONA HABITÁVEL E HABITABILIDADE

A definição de Zona Habitável (ZH) foi introduzida em 1959 (Huang (1959)) como sendo a região ao redor de uma estrela em que o ciclo de fusão de *H* em *He* seja estável por alguns bilhões de anos, permitindo que um planeta possa manter água, no estado líquido, em sua superfície. A estrela fornece a energia e a água funciona como um solvente eficiente que participa ativamente das reações químicas.

Posteriormente foi introduzida a ideia de uma Zona Habitável Galáctica, definida como a região mais provável da vida emergir em uma galáxia (ver, e.g., Lineweaver *et al.* (2004), Ward & Brownlee (2000), Gonzalez *et al.* (2001)). Nessa região o enriquecimento químico contém abundância adequada de **CHONPS** e a quantidade de eventos catastróficos capazes de interromper o processo de formação de vida (ou sua sobrevivência) é baixa comparada com a escala de tempo evolutivo terrestre. Lineweaver e colaboradores (2004) modelaram a evolução da nossa Galáxia e identificaram como a ZHG uma região entre 7 e 9 kiloparsecs distante do centro, cujo raio varia com o tempo, composta por estrelas formadas entre 4 e 8 bilhões de anos atrás. Eles estimaram que cerca de 75% das estrelas nessa ZHG são mais velhas do que o Sol, aumentando a probabilidade de existência de vida nessa região. Nela também há baixa ocorrência de supernovas e a idade das estrelas seria suficiente para produzir o enriquecimento químico necessário à formação de planetas terrestres e à possível evolução biológica. O conceito de ZH e sua relação com a química da vida pode ser flexibilizado de forma a incluir outros solventes e, hipoteticamente, outros elementos-base para formar uma bioquímica alternativa.

Embora essa flexibilidade saia da abordagem padrão, é interessante explorar algumas possibilidades com a matéria prima disponível no Universo. Por exemplo, W. Bains (Bains (2004)) argumenta que outros fluidos podem ser abundantes em diferentes locais

do Universo e a natureza química desses fluidos como solventes poderia modelar um ambiente que favoreceria a evolução de uma bioquímica não terrestre. Outros processos químicos podem satisfazer o impulso termodinâmico para o surgimento da vida através de mecanismos alternativos, consequentemente produzindo assinaturas químicas diferentes da bioquímica terrestre.

12.4.1. HABITABILIDADE

Habitabilidade, no contexto astrofísico, é definida pelo conjunto de características que permitem um planeta rochoso abrigar vida. Isso não significa, necessariamente, que o planeta tenha que abrigar vida ou que ele apresente as características necessárias para isso. Somente podemos considerar habitabilidade do ponto de vista do sucesso na Terra, portanto dentro desse conjunto devem estar, entre outras condições: a) a presença de uma fonte de energia necessária para o metabolismo, b) os elementos químicos para formar as biomoléculas (CHONPS), c) a existência de um planeta rochoso que possa abrigar essas biomoléculas e d) um solvente para viabilizar as reações químicas (como descrito, por exemplo, em Domagal-Goldman *et al.* (2016), Kaltenegger (2017). Deve ser ressaltado que condições geofísicas e geológicas foram também essenciais para a habitabilidade na Terra, tais como a presença de campo magnético, a tectônica de placas e a presença de escudos naturais como a Lua e Júpiter. Essas condições não serão discutidas neste artigo.

Estrelas com massa muito maior do que ~ 1,5 M_{Sol} tem uma vida menor que 3 bilhões de anos, evoluindo para o estágio de anã branca após a fase de nova. Isso faz com que elas não se adequem ao item a), pois espera-se que estrelas que sejam uma fonte de energia estável para possibilitar a evolução da vida permaneçam na Sequência Principal por, pelo menos, o tempo aproximado que o Sol permanece - cerca de 10 bilhões de anos. O item b) é contemplado pela química da nuvem que dá origem aos sistemas protoplanetários, possivelmente baseada nos **CHONPS**. Ela determina a condição de habitabilidade de um determinado nicho em função da abundância, versatilidade de combinação e pelo fato de formar as estruturas fundamentais da vida como a conhecemos. Quanto mais próximo da data atual, mais enriquecido quimicamente deve ser o meio que formará o disco e, provavelmente, permitirá a formação de planetas rochosos, o que leva ao item c). Planetas rochosos apresentam a interface sólido-líquido necessária à diversidade de condições evolutivas que eventualmente surgirão. Do ponto de vista químico, a água é considerada o candidato mais adequado ao papel de solvente, atendendo ao item d). Essa escolha deve-se a diversas características, entre elas a de ser uma molécula bastante abundante no Universo, permanecer no estado líquido durante um intervalo de temperatura muito maior do que o de outros solventes e permitir um bom isolamento térmico e elétrico no meio celular e intercelular.

A descoberta sistemática de novos exoplanetas já contabiliza, na data da redação deste artigo, 3672 planetas (sendo 12 do tipo terrestre), 2752 sistemas planetários e 616 sistemas com múltiplos planetas, e tem possibilitado uma melhor compreensão, e mesmo reavaliações, do conceito de ZH, à luz da dinâmica planetária e da energética disponível em estrelas de massa menor que ~ 1 M_{Sol}. Os exoplanetas do tipo terrestre encontrados permitem especular um futuro promissor para atender ao critério c) listado no parágrafo anterior. Condições muito diversas das encontradas no nosso Sistema Solar exigem uma reanálise das possibilidades de formação e estabilidade de órbitas planetárias, implicando em grande diversidade de condições atmosféricas para os exoplanetas do tipo terrestre.

Modelos evolutivos da atmosfera terrestre, considerando fatores como oceanos, desertos, vegetação e cobertura de nuvens são usados para obter as características ambientais planetárias cuja assinatura espectral possa ser usada para deduzir condições de habitabilidade ou fornecer indicações da presença de vida (ver, e.g., Kaltenegger *et al.* (2007), Kaltenegger (2017). Situações particulares que permitam a existência de água líquida fora da ZH devem consideradas, como é o caso de Europa, satélite de Júpiter, ou Encelado, satélite de Saturno onde a água é mantida líquida pelo aquecimento de seu interior devido às forças de maré. O estudo de exoplanetas é uma área em que alguns grupos no Brasil vem mantendo uma atividade regular há mais de 10 anos, em particular com forte participação do INPE e da Universidade Presbiteriana Mackenzie (Martioli (2006), Gould *et al.* (2010), Hwang *et al.* (2013), Kains *et al.* (2013), Street *et al.* (2013), Han *et al.* (2013), Almeida *et al.* (2013), Henderson *et al.* (2014), Tusnski & Valio (2014), Skowron *et al.* (2015), Valio *et al.* (2017).

Há diversos autores que consideram o Universo como um "ambiente biofílico" dentro do contexto ΛCDM, com base no argumento de que os **CHONPS** necessários para o aparecimento de compostos biológicos existem desde que o Universo tinha ~ 100 milhões de anos, conforme recentemente apresentado em Corazza (2017). Outros autores (Loeb (2014), Loeb (2016), Loeb *et al.* (2016b)) consideram que estes elementos podem ter sido produzidos quando o Universo era ainda mais jovem (com cerca de 30 milhões de anos) e sugerem um enriquecimento de *C* em estrelas de baixa massa (tipos espectrais K e M), as chamadas "CEMP stars" (Mashian & Loeb (2016)). Eles também argumentam que, a menos que a habitabilidade em torno de estrelas de baixa massa seja suprimida, a probabilidade de existência de vida, daqui a 10 trilhões de anos, será maior ao redor de estrelas com cerca de 0,1M_{Sol}. Nesse contexto a habitabilidade cósmica seria possível logo depois da formação da primeira geração de estrelas, após o Big Bang, e terminaria somente cerca de 10 trilhões de anos depois, quando todas as estrelas terão esgotado seu ciclo na Sequência Principal.

Recentemente, Adams e colaboradores (Adams *et al.* (2015), Adams (2016)) analisaram a influência dos valores da constante de estrutura gravitacional (definida como $\alpha_G \equiv Gm_p^2/\hbar c$) e da constante de estrutura fina $\alpha \equiv e^2/\hbar c$, sobre as condições de habitabilidade do Universo, e concluíram que essas condições são preservadas mesmo variando os parâmetros por algumas ordens de grandeza. Análise similar foi feita considerando a influência de variações na amplitude das flutuações de densidade primordial (Q) sobre a formação de estrelas, concluindo que a habitabilidade em outros universos é mais favorável e mais diversificada do que se imaginava.

Um Universo "viável", em termos de Habitabilidade, é definido pelo intervalo de valores de G que permite a existência de reações nucleares para formar estrelas e planetas habitáveis. Apesar de Adams analizar somente duas constantes físicas, α e G, e de ser desconhecida a distribuição de probabilidades a partir da qual os possíveis universos "escolhem" os valores dessas constantes, elas podem variar de ordens de grandeza, dentro do espaço de parâmetros permitidos, e ainda permitir Universos "viáveis". Mesmo considerando-se um conjunto grande de vínculos restritivos, ainda assim o limite encontrado de $\alpha_G/\alpha \simeq 10^{-34}$ sugere que Universos habitáveis podem existir dentro uma grande hierarquia de intensidades da força gravitacional e da força eletromagnética.

12.5. CONSIDERAÇÕES SOBRE A VIDA

Uma definição operacional ou uma teoria que descreva o fenômeno da vida é essencial para a distinção de formas de vida diferentes das observadas na Terra. Particularmente, a importância cresce à medida que novas missões para estudar corpos do sistema solar em busca de evidências de vida são propostas pelas agências espaciais de todo o mundo. Cleland e Chyba (2002 evidenciam essa importância: *"À medida que a ciência progride na compreensão da origem da vida na Terra (...) e com a atenção concentrando-se na astrobiologia e na busca pela vida em Marte e em Europa, lua de Júpiter, aumenta a necessidade de uma definição geral de vida"*.

Até o momento, não há uma definição que seja aceita pela comunidade ligada à Astrobiologia, independentemente do foco da disciplina envolvida (Trifonov (2012)), e a dificuldade é objeto de estudo de vários programas em andamento no mundo todo. Discussões mais detalhadas sobre as dificuldades dessa definição e as implicações que ela traria à comunidade podem ser encontradas, e.g., em Bedau & Cleland (2010),; Benner (2010). Não havendo uma teoria geral sobre a natureza de sistemas vivos, nenhuma das definições de vida fornece uma resposta satisfatória. Assim, é recomendável utilizar uma abordagem científica cautelosa e ao mesmo tempo flexível,

que auxilie sua identificação minimizando as chances de excluir outros sistemas vivos muito diferentes dos existentes na Terra. Algumas características parecem ser comuns a praticamente todos os sistemas vivos conhecidos e tem sido alvo de estudos durante as últimas décadas para sua melhor determinação, como descrito por Szostak e colaboradores (2002).

Como exemplo, Koshland (2002) propõe que sejam utilizados princípios termodinâmicos e cinéticos essenciais para que um sistema vivo, tal como o conhecemos, possa existir. Eles foram denominados "pilares da vida" e agrupados sob o acrônimo PICERAS, que significa: Programa; Improvisação; Compartimentalização; Energia; Regeneração; Adaptabilidade; e Isolamento Seclusion. Ainda assim, nem sempre o que é vivo apresenta todos essas características e nem sempre todos elas correspondem a algo vivo.

No Programa da NASA de Estudos dos Limites da Vida Orgânica em Sistemas Planetários (Hays (2015)) foram adotadas as seguintes características para tentar caracterizar um sistema vivo, a saber: ausência de equilíbrio termodinâmico; dependência da manutenção da taxa de variação da entropia (com valores negativos indicando o aumento de organização); manutenção de seu estado organizado, aumentando a entropia da vizinhança; presença de metabolismo, complexidade e organização; a existência de mecanismos de reprodução; e capacidade de desenvolvimento, evolução e autonomia. Essas características são responsáveis pelas funções básicas observadas nos sistemas vivos terrestres: adquirir energia do meio e convertê-la para a forma química; possuir uma rede de reações químicas, envolvendo os *building-blocks* em solvente apropriado, que sintetizam os compostos necessários para manutenção, crescimento e auto-replicação; e utilização de compostos químicos capazes de armazenar grandes quantidades de informação para que o sistema tenha condições de se auto-replicar e auto-perpetuar.

12.5.1. DOS ÁTOMOS AOS SISTEMAS VIVOS

Desde o início do Universo, a matéria tem evoluído na direção de formas mais complexas. Nos instantes iniciais foram produzidos H e He e posteriormente, outros elementos emergiram em decorrência da evolução das estrelas. Apesar de terem sido formados mais de 100 elementos químicos, os elementos C, H, O e N compõem boa parte dos compostos químicos observados no Universo, devido à facilidade com que elas formam ligações covalentes, produzindo uma grande variedade de moléculas no meio interestelar.

As primeiras moléculas orgânicas formadas continham um pequeno número de átomos, mas tinham a capacidade de formar compostos diferentes através de várias reações. As

transformações de ácido cianídrico (HCN) em cianoacetileno (HC_3N) e cianamida (CH_2N_2) e daí em aminoácidos e bases nucleicas é semelhante à transformação de formaldeído (CH_2O) em açúcar. O experimento de S. Miller mostrou que uma atmosfera contendo as moléculas CH_4, NH_3, H_2 e vapor d'água, submetida a descargas elétricas formam glicina, α –alanina e β –alanina (Miller (1953)). Experimentos posteriores realizados por S. Fox (1958, 1972) mostraram que o fluxo de CH_4 através de uma solução concentrada de NH_4OH incidindo sobre uma superfície similar à lava vulcânica ou sílica, com temperatura de 1000° C levou à formação de 12 aminoácidos (acido aspártico, acido glutâmico, glicina, alanina, valina, leucina, isoleucina, serina, treonina, prolina, tirosina e fenilalanina), potenciais percussores do RNA (Bada (2004), Powner (2009), Hud (2013)).

As análises de amostras obtidas em experimentos similares (Parker *et al.* (2011)), com uma mistura de CH_4, H_2S, NH_3, e CO_2, mostraram a formação de 23 aminoácidos e 4 aminas, incluindo 7 compostos organosulfurados. As abundâncias medidas nesse experimento são compatíveis com medidas em alguns meteoritos do tipo condritos carbonáceos. De acordo com Parker, os resultados sugerem que a mistura de gases, incluindo H_2S, deve ter ajudado na síntese de aminoácidos e aminas na Terra primitiva e durante o processo de formação do Sistema Solar. Já o ambiente contendo H_2S utilizado por Miller em seu experimento parece não ter sido comum na Terra primitiva, embora fosse possível encontra-lo próximo a vulcões.

Apesar dos organismos celulares possuírem sofisticada capacidade metabólica, a origem de sua rede de reações é pouco conhecida (Luisi (2012)). A estrutura central das redes metabólicas é similar em todos os organismos conhecidos estudados (Jeong et al. (2000), Braakman & Smith (2013)) levando a crer que estes mecanismos surgiram nos primórdios da evolução celular. Uma hipótese sobre a origem do metabolismo é que as redes de reação estabeleceram-se na Terra prebiótica como consequência do ambiente físico e químico do local onde a vida emergiu pela primeira vez, reforçando a hipótese de Bains (Bains (2004)) de que o solvente disponível molda a química necessária à vida. Com base nesses argumentos, pode-se imaginar que a sequência de reações químicas principais no metabolismo atual (glicólise e reações pentoses-fosfato) deve ser muito semelhante à do primeiro organismo vivo (Braakman & Smith (2013), Shapiro (2000), Huber *et al.* (2002)).

De acordo com Keller e colaboradores (Keller *et al.* (2014)) a sequência de reações que constituem o metabolismo central do C poderia ser restringida pelo ambiente do oceano rico em ferro do Arqueano, indicando que os primeiros processos metabólicos poderiam ter se originado no mundo prebiótico. Esses resultados sugerem que compostos prebióticos complexos, como aminoácidos e *proteinóides*, poderiam fazer parte de

uma rede complexa de reações químicas alimentada pela energética presente na atmosfera primitiva da Terra, levando à formação de proteínas e ao conjunto de reações que compõem o metabolismo central das células atuais.

A possibilidade de que essa química pode ter começado na nuvem protoestelar fica evidente nas observações atuais de moléculas complexas nas nuvens de gás e poeira no meio interestelar, como mostrado nas seções 3.2 e 3.3, e na composição química dos meteoritos condritos carbonáceos, como o meteorito de Murchison (P. Schmitt-Kopplin *et al.* (2012)). Dessas moléculas são formados os vinte aminoácidos, cinco bases nucleicas (nucleobases), dois açucares, glicerol, um aminoálcool (colina) e um ácido graxo (ácido palmítico) necessários para formar um sistema vivo (Olomucki (1993)).

A transição de sistemas não-vivos → vivos a partir de processos físico-químicos ainda é desconhecida e provavelmente ocorreu em sistemas muito pouco autopoiéticos[3] e fora da homeostase[4]. Mesmo que essa transição tenha ocorrido mais de uma vez, ou muitas vezes, devido às alterações ambientais extremas que ocorreram na Terra jovem, em algum momento ela se estabeleceu definitivamente, dando origem às formas de vida observadas hoje. Elas tem relação direta com as condições de habitabilidade no disco protoplanetário e, mais remotamente, com as condições biofílicas geradas após o surgimento das primeiras estrelas. Novamente, usando a argumentação acima e a visão proposta por Bains (2004), diferentes condições de habitabilidade, particularmente "locais", derivadas da formação do disco protoplanetário, podem, eventualmente, dar origem a formas de vida distintas da que conhecemos, caso elas sejam capazes de emergir dos processos físico-químicos locais.

12.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo ΛCDM é o melhor cenário para descrever a formação das primeiras estruturas do Universo e indica que os elementos fundamentais à vida (***CHONPS***) foram criados no Universo por volta de 100 milhões de anos. Em decorrência da expansão, resfriamento e interação gravitacional, as flutuações primordiais de densidade de matéria condensaram-se, formando imensas nuvens de gás, possibilitando a formação das primeiras estrelas, o início do processo de enriquecimento químico do Universo e a subsequente formação de poeira e moléculas complexas. Observações astronômicas, aliadas a simulações numéricas da química do meio interestelar, indicam que moléculas orgânicas complexas foram criadas em nuvens moleculares e sugerem que os compostos

[3] autopoiético - capaz de reproduzir a si próprio

[4] homeostase - capacidade do organismo vivo de apresentar uma situação físico-química característica e constante, dentro de determinados limites, mesmo diante de alterações impostas pelo meio ambiente.

necessários ao surgimento da vida, como a conhecemos, estão disponíveis e espalhados no Universo há vários bilhões de anos. Entretanto, o passo para formar o primeiro sistema vivo a partir de um conjunto de moléculas complexas ainda é desconhecido.

A combinação das condições de habitabilidade apresentadas na seção 4 permitiram que a Terra abrigasse um primeiro sistema vivo (ou diversos?) que conseguiu sobreviver e evoluir, tanto no aspecto de complexidade, no caso dos eucariontes, quanto no aspecto de adaptabilidade, no caso de bactérias e arqueobactérias. Há diversas evidências geológicas e geofísicas no sentido de que estes foram os passos para o surgimento e evolução da vida na Terra. Embora a compreensão do(s) mecanismo(s) de transição de um sistema não-vivo para vivo a partir de processos físico-químicos locais seja um tema bastante desafiador, um dos principais pontos deste artigo é argumentar que as condições físico-químicas necessárias (e, talvez, suficientes) para o aparecimento da vida, tal como a conhecemos, são comuns e remontam à formação das primeiras estrelas e ao enriquecimento químico do Universo como um todo.

É perfeitamente aceitável especular que a química da vida não seja necessariamente baseada em C e H_2O, porém outras possibilidades dependem do mesmo processo de enriquecimento químico universal. Mesmo que o Si seja menos abundante e menos versátil quimicamente, e que os solventes mencionados na subseção 4.1 sejam menos versáteis, do ponto de vista termodinâmico, a enorme quantidade de exoplanetas encontrados até o momento e a escala de tempo evolutivo de outros sistemas planetários, em comparação com o Sistema Solar, permite aceitar que as condições consideradas como prebióticas na Terra existam em vários outros pontos do Universo.

Por fim, é importante destacar que este artigo resultou das discussões ocorridas durante a disciplina "Fundamentos de Astrobiologia", ministrada no programa de pós-graduação em Astrofísica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em 2016 e é parte do esforço de alguns dos autores em oferecer um enfoque "astrobiológico" a determinados projetos de pesquisa ligados ao programa.

Por fim, é importante destacar que este artigo resultou das discussões ocorridas durante a disciplina "Fundamentos de Astrobiologia", ministrada no programa de pós-graduação em Astrofísica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em 2016 e é parte do esforço de alguns dos autores em oferecer um enfoque "astrobiológico" a determinados projetos de pesquisa ligados ao programa.

12.7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o revisor deste artigo pelos comentários e sugestões que melhoraram significativamente a redação do manuscrito, e também ao Dr. Isaac Joukhadar pelas incontáveis horas de discussão durante a seção sobre a definição de vida.

12.8. REFERÊNCIAS

[1] G.F. Smoot, C.L. Bennett, A. Kogut, E.L. Wright, J. Aymon, N.W. Boggess, E.S. Cheng, G. de Amici, S. Gulkis, M.G. Hauser et al., Astrophys. J. 396, L1 (1992).

[2] C.L. Bennett, A. Kogut, G. Hinshaw, A.J. Banday, E.L. Wright, K. Gorski, D.T. Wilkinson, R. Weiss, G.F. Smoot, S.S. Meyer et al., Astrophys. J. 436, 423 (1994).

[3] C.L. Bennett, R.S. Hill, G. Hinshaw, M.R. Nolta, N. Odegard, L. Page, D.N. Spergel, J.L. Weiland, E.L. Wright, M. Halpern et al., Astrophys.J. 148, 97 (2003).

[4] C.L. Bennett, D. Larson, J.L. Weiland, N. Jarosik, G. Hinshaw, N. Odegard, K.M. Smith, R.S. Hill, B. Gold, M. Halpern et al., Astrophys. J. Suppl. 208, 20 (2013).

[5] P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, M. Arnaud, M. Ashdown, F. Atrio-Barandela, J. Aumont, C. Baccigalupi, A.J. Banday, R.B. Barreiro et al., Astron. Astrophys 571, A16 (2014).

[6] P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, A.J. Banday, R.B. Barreiro, J.G. Bartlett, N. Bartolo et al., Astron. Astrophys. 594, A13 (2016).

[7] C. Patrignani, K. Agashe, G. Aielli, C. Amsler, M. Antonelli, D.M. Asner, H. Baer, S. Banerjee, R.M. Barnett, T. Basaglia et al., Chinese Physics C, 40, 100001 (2016).

[8] A. Loeb, International Journal of Astrobiology 13, 337 (2014).

[9] A. Loeb, ArXiv:1606.08926 (2016).

[10] S. Naoz, S. Noter e R. Barkana, Mon. Not. R. Astron. Soc. 373, L98 (2006).

[11] K. Nomoto, C. Kobayashi e N. Tominaga, Ann. Rev. Astron. Astrophys 51, 457 (2013).

[12] U. Maio e E. Tescari, Mon. Not. R. Astron. Soc. 453, 3798 (2015).

[13] G. Kulkarni, J.F. Hennawi, E. Rollinde e E. Vangioni, Astrophys. J. 787, 64 (2014).

[14] A. Tielens, The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium (Cambridge University Press, Cambridge, 2005).

[15] E. Herbst e E.F. van Dishoeck, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 47, 427 (2009).

[16] R.T. Garrod, Astrophys. J. 765, 60 (2013).

[17] P. Caselli e C. Ceccarelli, The Astron. Astrophys. Rev. 20, 56 (2012).

[18] P. Ehrenfreund e S.B. Charnley, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 38, 427 (2000).

[19] E.F. van Dishoeck e G.A. Blake, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 36, 317 (1998).

[20] S.R. Taylor, Solar System Evolution: a New Perspective (Cambrige University Press, Cambridge, 2005).

[21] A.N. Youdin e S.J. Kenyon From Disks to Planets (Springer Netherlands, Dordrecht, 2013).

[22] J.P. Williams e L.A. Cieza, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 49, 67 (2011).

[23] M. Olomucki. The Chemistry of Life (McGraw-Hill, Poughkeepsie. 1993).

[24] H. Cottin, J.M. Kotler, K. Bartik, H.J. Cleaves II, C.S. Cockell, J.P.P. de Vera, P. Ehrenfreund, S. Leuko, I.L.T. Kate, Z. Martins et al., Space Science Reviews 209, 1 (2015).

[25] C.M.D. Santos, L.P. Alabi, A.C.S. Fria,ca e D. Galante, International Journal of Astrobiology 15, 251 (2016).

[26] G. Horneck, N. Walter, F. Westall , J.L Grenfell, W.F. Martin, E. Gomez, S. Leuko, N. Lee, S. Onofri, K. Tsiganis et al., Astrobiology 16, 201 (2016).

[27] J. Quillfedt, Caderno Brasileiro de Ensino de F´ısica 27, 685 (2010).

[28] A.D. Neto, Caderno Brasileiro de Ensino de F´ısica 27, 641 (2010).

[29] I.G. Paulino-Lima e C.A.S. Lage, Boletim da Sociedade Astron˜omica Brasileira 29, 14 (2010).

[30] J.A.F. Pacheco, Revista Ci˜encia Hoje 318, 35 (2014).

[31] G. Zubay, Origins of life on the Earth and in the Cosmos (Academic Press, San Diego. 2000).

[32] J. Lunine, Astrobiology: a multi-disciplinary approach (Pearson Addison Wesley, Boston. 2004).

[33] A. Shaw, Astrochemistry: From Astronomy to Astrobiology (John Wiley & Sons, Hoboken, 2006).

[34] G. Horneck e P. Rettberg, Complete Course in Astrobiology (John Wiley & Sons, Hoboken. 2008).

[35] C. Cockell Astrobiology: understanding life in the cosmos (Wiley-Blackwell. Londres. 2015).

[36] A. Longstaff, Astrobiology: An Introduction (CRC Press. Fl´orida. 2015).

[37] D. Galante, E.P. da Silva, F. Rodrigues, J.E. Horvath e M.G.B. de Avellar, Astrobiologia: uma ci˜encia emergente (Tikinet, S˜ao Paulo. 2016).

[38] E. Calabrese, R.A. Hlo˜zek, J.R. Bond, M.J. Devlin, J. Dunkley, M. Halpern, A.D. Hincks, K.D. Irwin, A. Kosowsky, K. Moodley et al., Phys. Rev. D. 95, 063525 (2017). [39] J. Dunkley, E. Calabrese, J. Sievers, G.E. Addison, N. Battaglia, E.S. Battistelli, J.R. Bond, S. Das, M.J. Devlin, R. D˜unner et al., J. Cosmol. Astropart. Phys. 2013, 025 (2013).

[40] R. Hlozek, J. Dunkley, G. Addison, J.W. Appel, J.R. Bond, C.S. Carvalho, S. Das, M.J. Devlin, R. D˜unner, T.Essinger-Hileman et al., Astrophys. J. 749, 90 (2012).

[41] J.L. Sievers, R.A. Hlozek, M.R. Nolta, V. Acquaviva, G.E. Addison, P.A.R. Ade, P. Aguirre, M. Amiri, J.W. Appel, L.F. Barrientos et al., J. Cosmol. Astropart. Phys. 10, 060 (2013).

[42] R.R. Lindner, P. Aguirre, A.J. Baker, J.R. Bond, D. Crichton, M.J. Devlin, T. Essinger-Hileman, P. Gallardo, M.B. Gralla, M. Hilton et al., Astrophys. J. 803, 79 (2015).

[43] C.L. Reichardt, L. Shaw, O. Zahn, K.A. Aird, B.A. Benson, L.E. Bleem, J.E. Carlstrom, C.L. Chang, H.M. Cho, T.M. Crawford et al., Astrophys. J. 755, 70 (2012).

[44] E. Shirokoff, C.L. Reichardt, L. Shaw, M. Millea, P.A.R. Ade, K.A. Aird, B.A. Benson, L.E. Bleem, J.E. Carlstrom, C.L. Chang et al., Astrophys. J. 736, 61 (2011).

[45] K.T. Story, C.L. Reichardt, Z. Hou, R. Keisler, K.A. Aird, B.A. Benson, L.E. Bleem, J.E. Carlstrom, C.L. Chang, H.M. Cho et al., Astrophys. J. 779, 86 (2013).

[46] http://www.sdss.org/collaboration/citing-sdss/, acessado em 09/07/2017.

[47] S.J. Maddox, G. Efstathiou, W.J. Sutherland e J. Loveday, Mon. Not. R. Astron. Soc. 243, 692 (1990).

[48] http://www.2dfgrs.net/, acessado em 09/07/2017.

[49] http://www.6dfgrs.net/, acessado em 09/07/2017.

[50] A.G.G.M. Tielens, Rev. Mod. Phys. 85, 1021 (2013). [51] A. Loeb e S. Furlanetto, The First Galaxies in the Universe. (Princeton University Press, Princeton, 2013).

[52] S. Wilson, P.F. Bernath e R. McWeeny's, Handbook of Molecular Physics and Quantum Chemistry, 3 Volume Set (Wiley, Bognor Regis, 2003).

[53] W. Short e I. Cairns, in Proceedings from 8th Australian Space Science Conference (National Space Society of Australia Ltd, Sydney, 2009).

[54] D. Hollenbach e E.E. Salpeter, Astrophys. J. 163, 155 (1971).

[55] R. Pagni, Journal of Chemical Education 84, 233 (2007).

[56] H.I. Ewen e E.M. Purcell, Nature 168, 356 (1951).

[57] H.C. van de Hulst, Astron. J. 56, 144 (1951).

[58] A.C. Cheung, D.M. Rank, C.H. Townes, D.D. Thornton e W.J. Welch, Physical Review Letters 21, 1701 (1968).

[59] A.C. Cheung, D.M. Rank, C.H. Townes, D.D. Thornton e W.J. Welch, Nature 221, 626 (1969).

[60] R.W. Wilson, K.B. Jefferts e A.A. Penzias, Astrophys. J. Lett. 161, L43 (1970). [61] S. Kwok, Astrophys. Space Science 319, 5 (2009).

[62] S. Kwok, Organic Matter in the Universe (Wiley, Weinheim, 2011).

[63] E. Van Dishoek, Ann. Rev. Astron. Astrophys 42, 119167 (2004).

[64] T. Henning e D. Semenov, Chemical Reviews 113, 9016 (2013).

[65] A. Brack, Chemistry & Biodiversity 4, 665 (2007).

[66] Y. Aikawa, E. Herbst, H. Roberts e P. Caselli, Astrophys. J. 620, 330 (2005).

[67] R.T. Garrod, Astrophys. J. 778, 158 (2013).

[68] S.S. Huang, Publ. of the Astr. Soc. of the Pacific 71, 421 (1959).

[69] C.H. Lineweaver, Y. Fenner e B.K. Gibson, Science 303, 59 (2004).

[70] P. Ward e D. Brownlee, S´os no Universo? Porque a vida inteligente ´e imposs´ivel fora do planeta Terra. (Campus, S~ao Paulo, 2000).

[71] G. Gonzalez, D. Brownlee e P. Ward, Icarus 152, 185 (2001).

[72] W. Bains, Astrobiology 4, 137 (2004).

[73] S.D. Domagal-Goldman, K.E. Wright, K. Adamala, L.A. de la Rubia, J. Bond, L.R. Dartnell, A.D. Goldman, K. Lynch, M.E. Naud, I.G. Paulino-Lima et al., Astrobiology 16, 561 (2016).

[74] L. Kaltenegger, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 55, 433 (2017).

[75] L. Kaltenegger, W.A. Traub e K.W. Jucks, Astrophys. J. 658, 598 (2007).

[76] E. Martioli, Exoplanetas: o que s˜ao e como detect´a-los., Disserta¸c˜ao de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, S˜ao Jos´e dos Campos (2006).

[77] A. Gould, S. Dong, B.S. Gaudi, A. Udalski, I.A. Bond, J. Greenhill, R.A. Street, M. Dominik, T. Sumi, M.K. Szyma´nski et al., Astrophys. J. 720, 1073 (2010).

[78] K.H. Hwang, J.Y. Choi, I.A. Bond, T. Sumi, C. Han, B.S. Gaudi, A. Gould, V. Bozza, J.P. Beaulieu, Y. Tsapras et al., Astrophys. J. 778, 55 (2013).

[79] N. Kains, R.A. Street, J.Y. Choi, C. Han, A. Udalski, L.A. Almeida, F. Jablonski, P.J. Tristram, U.G. Jørgensen, M.K. Szyma´nski et al., Astron. Astrophys. 552, A70 (2013).

[80] R.A. Street, J.Y. Choi, Y. Tsapras, C. Han, K. Furusawa, M. Hundertmark, A. Gould, T. Sumi, I.A. Bond, D. Wouters et al., Astrophys. J. 763, 67 (2013).

[81] C. Han, A. Udalski, J.Y. Choi, J.C. Yee, A. Gould, G. Christie, T.G. Tan, M.K. Szymanski, M. Kubiak, I. Soszynski et al., Astrophys. J. Lett. 762, L28 (2013).

[82] L.A. Almeida, F. Jablonski e C.V. Rodrigues, Astrophys. J. 766, 11 (2013).

[83] C.B. Henderson, H. Park, T. Sumi, A. Udalski, A. Gould, Y. Tsapras, C. Han, B.S. Gaudi, V. Bozza, F. Abe et al., Astrophys. J. 794, 7 (2014).

[84] L.R.M. Tusnski e A. Valio, in Formation, Detection, and Characterization of Extrasolar Habitable Planets, editado por N. Haghighipour, (Cambridge University Press, Cambridge, 2014).

[85] J. Skowron, I.G. Shin, A. Udalski, C. Han, T. Sumi, Y. Shvartzvald, A. Gould, D. Dominis Prester, R.A. Street, U.G. Jørgensen et al., Astrophys. J. 804, 33 (2015).

[86] A. Valio, R. Estrela, Y. Netto, J.P. Bravo e J.R. de Medeiros, Astrophys. J. 835, 294 (2017).

[87] L.C. Corazza, The Role of Population II and III Stars in the Cosmic Chemical Evolution, Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, S˜ao Jos´e dos Campos (2017).

[88] A. Loeb, R.A. Batista e D. Sloan, J. Cosmol. Astropart. Phys. 8, 040 (2016).

[89] N. Mashian e A. Loeb, Mon. Not. R. Astron. Soc. 460, 2482 (2016).

[90] F.C. Adams, K.R. Coppess e A.M. Bloch, J. Cosmol. Astropart. Phys. 9, 030 (2015).

[91] F.C. Adams, J. Cosmol. Astropart. Phys. 02, 042 (2016).

[92] C.E. Cleland e C.F. Chyba, Orig. Life Evol. Biosph. 32, 387 (2002).

[93] E.N. Trifonov, Journal of Biomolecular Structure and Dynamics 29, 647 (2012).

[94] M.A. Bedau e C.E. Cleland, The Nature of Life (Cambridge University Press, Cambridge, 2010).
[95] S. Benner, Astrobiology 10, 1021 (2010).

[96] J.W. Szostak, J.C. Wheeler, S.A. Benner, J.A. Berry, R. Blake, W.M. Calvin, M.J. Daly, K.H. Freeman, J.P. Cogarten, J.F. Kasting et al., The Astrophysical Context of Life (National Research Council, Washington, 2005).

[97] D.E. Koshland, Science 295, 2215 (2002).

[98] L. Hays, NASA Astrobiology Strategy (NASA, Washington, 2015).

[99] S.L. Miller, Science 117, 528 (1953).

[100] S.W. Fox e K. Dose, Molecular Evolution and the Origin of Life (W.H.Freeman & Co Ltd, San Francisco, 1972).

[101] S.W. Fox e K. Harada, Science 128, 1214 (1958).

[102] J.L. Bada, Earth and Planetary Science Letters 226, 1 (2004).

[103] M.W. Powner, B. Gerland e J.D. Sutherland, Nature 459, 239 (2009).

[104] N.V. Hud, B.J. Cafferty, R. Krishnamurthy e L.D. Williams, Chem. Biol., 20, 466 (2013).

[105] E.T. Parker, H.J. Cleaves, J.P. Dworkin, D.P. Glavin, M. Callahan, A. Aubrey, A. Lazcano e J.L. Bada, PNAS 108, 5526 (2011).

[106] P.L. Luisi, Chemistry & Biodiversity, 9, 2635 (2012).

[107] H. Jeong, B. Tombor, R. Albert, Z.N. Oltvai e A.L. Barab´asi, Nature 407, 651 (2000).

[108] R. Braakman e E. Smith, Phys Biol 10, 011001 (2013).

[109] R. Shapiro, IUBMB Life 49, 173 (2000).

[110] H. Huber, M.J. Hohn, R. Rachel, T. Fuchs, V.C. Wimmer e K.O. Stetter, Nature 417, 63 (2002).

[111] M.A. Keller, A.V. Turchyn e M. Ralser, Molecular Systems Biology 10, 725 (2014).

[112] P. Schmitt-Kopplin, Z. Gabelica, R.D. Gougeon, A. Fekete, B. Kanawati, M. Harir, I. Gebefuegi, G. Eckel e N. Hertkorn, PNAS 107, 2763 (2010).

Capítulo 12

Pesquisas em Astrofísica no INPE*

Oswaldo Duarte Miranda**

(revisado por João Braga)

* Revisado em março de 2015 e junho de 2018

** e-mails: oswaldo.miranda@inpe.br, joao.braga@inpe.br

Pesquisas em Astrofísica no INPE

12.1. INTRODUÇÃO 3

12.2. AS PESQUISAS EM ASTROFÍSICA NO INPE 5

12.3. INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA 6

12.3.1. INSTRUMENTOS NO SOLO 6

12.3.2. INSTRUMENTOS NO ESPAÇO 11

12.4. CONCLUSÃO 12

12.5. BIBLIOGRAFIA 13

12.1. INTRODUÇÃO

A Astrofísica estuda os objetos e as estruturas que formam o Universo em que vivemos. A Astrofísica é uma das atividades científicas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) que representa de forma mais direta o nome do Instituto. Historicamente, a origem da pesquisa em Astrofísica no INPE está ligada ao desenvolvimento da Ciência Espacial no Instituto. O objetivo inicial do INPE era estudar o espaço circunvizinho à Terra, e mais tarde esse campo de estudo foi ampliado passando a abranger o espaço exterior. Para isso, houve necessidade de desenvolver instrumentos que fizessem observações do espaço, a bordo de balões, foguetes e satélites, já que a atmosfera terrestre absorve grande parte dos sinais que vêm do espaço.

As pesquisas em Astrofísica no INPE começaram na década de 1960 e continuam até hoje. As primeiras pesquisas relacionavam-se com a Astrofísica de Altas Energias, que tem como objetivo entender os mecanismos físicos responsáveis pelas emissões de raios-X e gama oriundas de objetos cósmicos como, por exemplo, pulsares, estrelas binárias, galáxias. Posteriormente, houve o desenvolvimento de estudos na área de radioastronomia, com a incorporação pelo INPE em 1980 do Rádio Observatório do Itapetinga, em Atibaia e as colaborações em radiação cósmica de fundo em microondas com universidades dos Estados Unidos. Em meados da década de 1980, iniciaram-se os estudos relacionados com as observações na faixa óptica do espectro eletromagnético, com a vinda de um grupo de pesquisadores nessa área. Na década seguinte, iniciaram-se os estudos em ondas gravitacionais.

É importante destacar que 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, também é muito importante conhecer as estrelas, planetas, galáxias e cometas. Por isso, realizar pesquisas em Astrofísica significa também conhecer o nosso meio ambiente. É conveniente lembrar que o meio ambiente é o conjunto dos fatores externos que podem influir na 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, que é uma estrela, é o componente da natureza que mais diretamente afeta a vida na Terra. É ele quem define o regime de temperaturas 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 no aumento da 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.

A Astrofísica pode também contribuir para a preservação da vida na Terra, seja por meio de previsão de catástrofes, como possíveis choques de cometas ou asteróides de grandes proporções com a Terra, seja por meio de estudos que possibilitem a colonização de outros planetas por seres humanos no futuro. O nosso planeta corre o risco de ser bombardeado por algum corpo que esteja vagando pelo espaço, como aconteceu no final do século passado com Júpiter, e sofrer graves consequências, entre elas a extinção da espécie humana. Existem evidências muito fortes de que no passado algo semelhante tenha ocorrido aqui na Terra e tenha provocado o desaparecimento de muitas espécies, entre elas todas as espécies de 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 a de desmistificar crendices irracionais e sem fundamento científico que, infelizmente, persistem até os dias de hoje, como a astrologia.

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 no qual os recursos financeiros sejam abundantes e ainda há muita coisa que precisa ser feita 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. O conhecimento é a arma mais poderosa para o desenvolvimento econômico e social.

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: as câmaras de vídeo com base no CCD ("charge coupled device"), como as de uso profissional ou 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. Outro exemplo de aplicação prática dos conhecimentos proporcionados pela Astrofísica está na Meteorologia, que se valeu de estudos acerca da atmosfera de planetas para melhorar os modelos sobre o comportamento da atmosfera terrestre.

Além desses exemplos, pode ser citado ainda o enorme potencial que a Astrofísica tem de tentar responder a um dos maiores anseios do ser humano, que é o de 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.

Atualmente, as pesquisas em astrofísica realizadas pelo INPE estão concentradas na Divisão de Astrofísica (DIDAS), que é uma das três divisões científicas da Coordenação Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA) 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 vistos no céu, como estrelas, galáxias, quasares, buracos negros, entre outros.

Tradicionalmente, a DIDAS desenvolve pesquisas que necessitam de observações com instrumentos que ainda não estão disponíveis no Brasil, de forma a estimular o desenvolvimento de instrumentação científica no País e a formação de recursos humanos altamente qualificados. Isso se deve ao fato do INPE possuir uma boa infraestrutura para esse tipo de atividade, que normalmente não é encontrada nas universidades ou em outros centros de pesquisa brasileiros. Em particular, as atividades ligadas ao desenvolvimento instrumental espacial, com experimentos tanto em solo quanto a bordo de balões, foguetes, e satélites, têm o seu lugar natural no INPE. Como consequência direta dessa iniciativa, há o engajamento de empresas brasileiras em projetos de alto teor tecnológico agregado.

Atrelado à sua atuação técnico-científica, o INPE mantém um curso de pós-graduação, com mestrado e doutorado, em astrofísica. Os temas das dissertações e teses são ligados às pesquisas desenvolvidas na DIDAS. Também é mantido, no âmbito da CEA, um Setor de Lançamento de Balões à disposição da comunidade científica nacional e internacional para a realização de experimentos que envolvam a necessidade de utilização de balões estratosféricos.

12.2. AS PESQUISAS EM ASTROFÍSICA NO INPE

Atualmente, a pesquisa na DIDAS está dividida em seis linhas, embora essa divisão seja permeada pela atuação e interação de pesquisadores em diferentes linhas. As linhas de pesquisa são: Astrofísica de Ondas Gravitacionais, Cosmologia, Astrofísica de Altas Energias, Radiofísica, Heliofísica e Astrofísica Óptica e no Infravermelho. Essas linhas contam com a participação, além dos pesquisadores da DIDAS, de estudantes de pós-graduação (mestrado e doutorado), de iniciação científica, bolsistas de pós-doutoramento e pesquisadores visitantes.

Dentro das áreas de atuação das seis linhas de pesquisa supramencionadas são feitos os seguintes estudos: estudos teóricos e observacionais em Astrofísica Estelar, Astrofísica Extragaláctica, Cosmologia e Planetas Extra-Solares. É estudada a Radiação Cósmica de Fundo em Microondas, bem como fontes

cósmicas de radiação-X e gama. São estudados o Sol, as explosões solares e seus efeitos de propagação no meio interplanetário, as relações solares-terrestres e como essas atividades afetam o clima espacial. É estudado o Universo através do seu espectro de ondas gravitacionais. Para isso encontra-se em operação, e em fase de aperfeiçoamento, o primeiro Observatório de Ondas Gravitacionais do Brasil. São estudados através de ondas de rádio objetos como: quasares, galáxias, estrelas e regiões de formação de estrelas, tanto no contínuo, quanto em linhas espectrais.

12.3. INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

A pesquisa em Astrofísica visa entender a origem, evolução e destino do Universo e de seus componentes. Para isso é necessário obter dados ao longo de todo o espectro eletromagnético e mesmo fora dele, quando consideramos as ondas gravitacionais e as partículas de origem cósmica. Dessa forma, são utilizados instrumentos que operam no solo, como telescópios ópticos e radiotelescópios, e instrumentos no espaço, tais como telescópios e experimentos embarcados em balões, foguetes e satélites. Os pesquisadores da DIDAS utilizam-se praticamente de todo o arsenal de instrumentação disponível hoje em dia para coletar os dados relevantes para suas pesquisas.

12.3.1. INSTRUMENTOS NO SOLO

A DIDAS tem tido participação importante no desenvolvimento de novos instrumentos para uso com os telescópios do Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA), do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTIC). Tal foi o caso da primeira câmara CCD criogênica, em 1987, no desenvolvimento do fotômetro rápido FOTRAP, no desenvolvimento do fotômetro rápido CCD e no projeto da Câmara Infravermelha (CamIV). Atualmente, em desenvolvimento, encontra-se o instrumento SPARC-4 (*Simultaneous Polarimeter and Rapid Camara in Four Bands*) que, como o nome sugere, reúne características de uma câmara fotométrica multi-banda com capacidades polarimétricas (Figura 1). Esse futuro instrumento será utilizado no telescópio "*Perkin Elmer*" do LNA. A DIDAS também esteve envolvida no desenvolvimento de instrumentação para o telescópio SOAR (*Southern Astrophysical Research*). O SOAR é um telescópio com espelho primário de 4,1 m de diâmetro e está localizado em Cerro Pachon (Chile).

Figura 1: Esquema do instrumento SPARC-4 em desenvolvimento na DAS/INPE.

Atualmente, a DIDAS é responsável pela operação do Rádio-Observatório do Itapetinga (ROI), situado numa área de 3 alqueires dentro do município de Atibaia (SP). Esse é o local onde se encontra a maior antena destinada à radioastronomia no Brasil. Em funcionamento desde o início da década de 1970, o ROI está à disposição de toda a comunidade científica nacional. Possui uma antena de 13,7 m de diâmetro capaz de receber sinais de frequências entre 1 e 150 GHz (Figura 2). São realizadas várias pesquisas astronômicas, incluindo as relacionadas a física solar, formação de estrelas, astronomia galáctica e extragaláctica.

Outro instrumento em operação pela DIDAS é o Espectrógrafo Solar Brasileiro (em inglês, *Brazilian Solar Spectroscope* – BSS), que opera com uma antena de 9 m de diâmetro, instalado atualmente na unidade do INPE em Cachoeira Paulista (SP). Esse instrumento é dedicado à observação, e

visualização em tempo real, da atividade solar em ondas de rádio decimétricas (1.000 – 2.500 MHz). A emissão rádio nessas frequências é proveniente de uma região onde ocorre a aceleração das partículas que geram as explosões solares. Esse instrumento faz parte da rede de coleta de dados do Programa de Clima Espacial do INPE (EMBRACE).

Figura 2: O Rádio Observatório de Itapetinga (ROI)

Em fevereiro de 2015 foi concluída a fase II de desenvolvimento do primeiro Interferômetro Decimétrico Brasileiro (em inglês *Brazilian Decimetric Array* – BDA) que, na sua configuração final, consistirá de trinta e oito antenas de 4 m de diâmetro. O projeto BDA, fruto de colaboração entre pesquisadores da DIDAS e instituições da Índia e Estados Unidos, é otimizado para fazer vários mapas bidimensionais do Sol nas frequências de 1,2 GHz a 1,7 GHz; 2,8 GHz e 5,6 GHz a cada segundo, com resolução de até 0,7 x 1,1 minuto de arco.

O BDA será usado para estudar questões fundamentais da física solar, além de realizar investigações científicas que envolvam fontes astrofísicas galácticas e extra-galácticas. Também integrará a rede de coleta de dados do programa de Clima Espacial do INPE. A Figura 3 mostra a disposição do BDA em março de 2015 e esse interferômetro encontra-se operando na unidade do INPE em Cachoeira Paulista (SP).

Figura 3: A disposição do arranjo central do Interferômetro Decimétrico Brasileiro (BDA) em sua fase II.

O radiotelescópio GEM (do inglês *Galactic Emission Mapping* – Mapeamento da Emissão Galáctica) é fruto de projeto desenvolvido em uma colaboração internacional envolvendo pesquisadores da DIDAS, Estados Unidos, Itália e Colômbia. Trata-se de uma antena de 5,5 m de diâmetro (Figura 4) capaz de operar com receptores rádio em cinco frequências: 408 MHz; 1,465 GHz; 2,3 GHz; 5 GHz e 10 GHz . O objetivo é fazer um levantamento, em forma de mapas, de todo céu nas frequências mencionadas. Esses mapas são importantes para a limpeza de emissões contaminantes em mapas da radiação cósmica de fundo e já estão sendo utilizados para esse fim por pesquisadores da DAS e de instituições parceiras. Atualmente, o GEM opera na frequência de 5 GHz e possui capacidade de medir a polarização da emissão Galáctica. Para minimizar o ruído proveniente do sistema detector, foi desenvolvido um refrigerador que permite ao GEM operar a temperatura de 77 K. Esse instrumento também está instalado na unidade do INPE em Cachoeira Paulista (SP).

Figura 4: O Radiotelescópio GEM ("Galactic Emission Mapping")

Outro projeto em desenvolvimento pela DAS é o Observatório de Ondas Gravitacionais Mário Schenberg – Projeto Gráviton (Figura 5). Esse projeto é um esforço de cientistas brasileiros de diversas instituições (DAS/INPE, USP, UNICAMP, ITA, entre outras) 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 Astrofísica, 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 astronômica para estudo do Universo, permitindo observar fenômenos que seriam impossíveis de ser observados no espectro eletromagnético. A antena Schenberg consiste numa esfera maciça com 65 cm de diâmetro, feita de uma liga de cobre-alumínio e com massa da ordem de 1.150 kg. O telessensor será capaz de converter a energia das ondas gravitacionais em impulsos elétricos que serão amplificados por dispositivos supercondutores. Após a digitalização, os dados serão analisados computacionalmente. Para minimizar ruídos externos o detector terá que ser mantido sob alto vácuo e refrigerado a temperaturas ultracriogências da ordem de 0,02 K (ou -273,14 °C)

Figura 5: Esquema da antena detectora de ondas gravitacionais Schenberg.

12.3.2. INSTRUMENTOS NO ESPAÇO

Além dos instrumentos citados acima, que se configuram como instrumentos de solo, a DIDAS tem desenvolvido instrumentos para operar no espaço. Em particular, o Projeto MASCO teve como objetivo construir um telescópio capaz de produzir imagens em raios X e gama de várias regiões do Universo. As emissões cósmicas nessas faixas de frequências só podem ser observadas a grandes altitudes, por causa da absorção da atmosfera terrestre. Para realizar essas observações, o telescópio foi colocado a bordo de uma plataforma estabilizada suspensa por balão estratosférico inflado por hidrogênio e realizou as observações a 40 km de altitude, numa atmosfera residual correspondente a 0,01% da atmosfera na superfície terrestre. A técnica utilizada para obter as imagens em raios X e gama é conhecida como **más**cara **co**dificada, daí o nome do projeto, que se originou das primeiras sílabas das palavras que formam o nome da técnica de imageamento utilizada neste instrumento. O MASCO foi o primeiro experimento astronômico brasileiro embarcado. Essas pesquisas [5] continuam com o projeto do satélite MIRAX (Monitor e Imageador de Raios X) e seu protótipo em balão protoMIRAX (Figura 6).

Figura 6: O telescópio imageador de raios X protoMIRAX.

O programa de satélites científicos do INPE, iniciado nos finais do anos 1990, prevê o desenvolvimento de três satélites científicos, dedicados às áreas de Geomagnetismo, Aeronomia, e Astrofísica. O conceito de uma câmara imageadora de raios-X foi selecionado para ser o principal experimento do satélite astrofísico desse programa. O experimento é um monitor e imageador de raios X duros (MIRAX), constituído basicamente de um detector de última geração composto por uma liga de telureto de cádmio e telureto de zinco (CZT).

A massa do instrumento será de aproximadamente 50 kg sendo colocado em órbita equatorial circular a 750 km de altitude. O principal objetivo científico da missão é realizar um monitoramento contínuo de uma ampla região contendo o Centro Galáctico e suas vizinhanças. Isso proporcionará um estudo detalhado de fontes transientes de raios X, além de estudos de microquasares, pulsares de acréscimo, buracos negros estelares, explosões de radiação-gama, entre outros objetos e fenômenos. Estão previstos dois lançamentos de balões estratosféricos, provavelmente em 2016, para testar conceitos e subsistemas que serão usados no satélite MIRAX. As missões de desenvolvimento, em balões estratosféricos, são chamadas de experimentos proto-MIRAX.

12.4. CONCLUSÃO

Os pesquisadores da DIDAS têm contribuído 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 ao longo deste texto. Em termos de avanços na área de instrumentação, vários sistemas foram desenvolvidos em todos os campos de atuação dos pesquisadores do INPE. Em particular, as pesquisas em instrumentação astronômica, realizadas pelo INPE, são responsáveis pela quase totalidade da produção nacional da área. As pesquisas realizadas pela DIDAS contribuem também para a formação de pessoas altamente qualificadas que são incorporadas aos vários segmentos produtivos brasileiros, seja da área técnico-científica ou de áreas correlatas, o que garante um retorno altamente importante para a sociedade brasileira.

12.5. BIBLIOGRAFIA

[1] Villela Neto, T., Pesquisas em astrofísica no INPE, publicação interna do INPE (INPE-7177-PUD/38), São José dos Campos, 2003.

[2] Wuensche, C.A. & Rodrigues, C.V., Pesquisa em astrofísica no INPE, publicação interna do INPE, São José dos Campos, 2004.

[3] Caminhos para o Espaço, editora Contexto, organização por F. de Oliveira, 1991.

[4] Portal WeB da Divisão de Astrofísica do INPE – http://www.das.inpe.br

[5] Braga, J., Astronomia Espacial. Em: História da Astronomia Brasileira, Oscar Matsuura (Org.), Companhia Editora de Pernambuco, v. II, pp. 550-578, 2014.